

**EVALUACIÓN DE INDICADORES DE HUELLA HÍDRICA EN LA
PRODUCCIÓN DE UN CULTIVO DE CEBOLLA DE BULBO Y PAPA EN LOS
MUNICIPIOS DE DUITAMA Y SAMACA BOYACÁ.**

CRISTHIAN CAMILO HIGUERA SANCHEZ

OSCAR JULIÁN JAIMES HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C –2019

**EVALUACIÓN DE INDICADORES DE HUELLA HÍDRICA EN LA
PRODUCCIÓN DE UN CULTIVO DE CEBOLLA DE BULBO Y PAPA EN LOS
MUNICIPIOS DE DUITAMA Y SAMACA BOYACÁ.**

CRISTHIAN CAMILO HIGUERA SANCHEZ

OSCAR JULIÁN JAIMES HERNÁNDEZ

Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.

ASESOR: SERGIO ISRAEL ROJAS

INGENIERO QUIMICO, INGENIERO AMBIENTAL,

INGENIERIA CIVIL MSC.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C –2019



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., Noviembre de 2019.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO | 13 |
| 1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN | 13 |
| 1.1.1 Tipo De Investigación | 13 |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 13 |
| 1.2.1 Antecedentes del problema | 14 |
| 1.2.2 Pregunta de Investigación | 15 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN | 15 |
| 1.4 OBJETIVOS | 16 |
| 1.4.1 Objetivo general | 16 |
| 1.4.2 Objetivos específicos | 16 |
| 2 MARCOS DE REFERENCIA | 17 |
| 2.1 MARCO CONCEPTUAL | 17 |
| 2.2 MARCO TEÓRICO | 19 |
| 2.3 MARCO JURÍDICO | 21 |
| 2.4 MARCO GEOGRÁFICO | 23 |
| 2.5 MARCO DEMOGRÁFICO | 24 |
| 2.6 ESTADO DEL ARTE | 25 |
| 3 METODOLOGÍA | 28 |
| 3.1.1 Variables utilizadas para el cálculo de los indicadores de huella hídrica total de los cultivos de Papa y Cebolla de Bulbo | 28 |
| 3.2 FASES DEL TRABAJO DE GRADO | 30 |
| 3.2.1 Ubicación de áreas de estudio | 30 |
| 3.3 GENERALIDADES DE LOS CULTIVOS | 31 |
| 3.3.1 Papa (Solanum tuberosum) | 31 |
| 3.3.2 Cebolla cabeza (Allium cepa) | 33 |
| 3.4 INSTRUMENTOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS | 37 |
| 3.4.1 Modelo Cropwat 8.0 | 37 |
| 3.4.2 Información climatológica | 38 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4.3 | Datos empleados para el cálculo de la huella hídrica..... | 41 |
| 4 | RESULTADOS | 47 |
| 4.1 | CUANTIFICACIÓN HUELLA HÍDRICA AZUL..... | 47 |
| 4.2 | CUANTIFICACIÓN HUELLA HÍDRICA VERDE..... | 49 |
| 4.3 | CUANTIFICACIÓN HUELLA HÍDRICA GRIS | 52 |
| 5 | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 59 |
| 6 | FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS | 65 |
| 7 | CONCLUSIONES | 66 |
| 8 | RECOMENDACIONES..... | 68 |
| 9 | BIBLIOGRAFÍA | 69 |
| | 10 ANEXOS | 72 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| ILUSTRACIÓN 1 ESQUEMA COMPONENTES DE LA HUELLA HÍDRICA EN UNA CUENCA | 18 |
| ILUSTRACIÓN 2: UBICACIÓN DEPARTAMENTO DE BOYACÁ..... | 23 |
| ILUSTRACIÓN 3 ETAPAS FENOLÓGICAS CULTIVO DE PAPA (MORENO, CESAN LASSO, & VALBUENA BENAVIDES, 2014)..... | 33 |
| ILUSTRACIÓN 4 ETAPAS FENOLÓGICAS DEL CULTIVO DE CEBOLLA DE BULBO (ICA, 2016)..... | 37 |
| ILUSTRACIÓN 5: REQUERIMIENTOS HÍDRICOS CULTIVO DE CEBOLLA | 48 |
| ILUSTRACIÓN 6 REQUERIMIENTOS HÍDRICOS CULTIVO DE PAPA | 48 |
| ILUSTRACIÓN 7: VALORES DE PRECIPITACIÓN EFECTIVA PARA CULTIVO DE CEBOLLA | 50 |
| ILUSTRACIÓN 8: VALORES DE PRECIPITACIÓN EFECTIVA PARA CULTIVO DE CEBOLLA | 51 |
| ILUSTRACIÓN 9: PORCENTAJE DE HUELLA HÍDRICA TOTAL CEBOLLA..... | 58 |
| ILUSTRACIÓN 10: PORCENTAJE DE HUELLA HÍDRICA TOTAL PAPA | 58 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1. MARCO LEGAL APLICADO AL PROYECTO | 21 |
| TABLA 2. FASES DE LA METODOLOGÍA..... | 30 |
| TABLA 3. CARACTERÍSTICAS ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO | 31 |
| TABLA 4 DATOS METEOROLÓGICOS DEL MUNICIPIO DE DUITAMA | 39 |
| TABLA 5 DATOS METEOROLÓGICOS DEL MUNICIPIO DE SAMACA | 39 |
| TABLA 6 PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL MUNICIPIO DE DUITAMA | 40 |
| TABLA 7 PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL MUNICIPIO DE SAMACA | 40 |
| TABLA 8 DURACIÓN EN DÍAS DE CADA ETAPA DE CRECIMIENTO | 42 |
| TABLA 9 VALORES DEL COEFICIENTE ÚNICO DEL CULTIVO, Kc | 42 |
| TABLA 10 .RENDIMIENTO CULTIVOS..... | 43 |
| TABLA 11: CANTIDADES DE FERTILIZANTE APLICADOS EN CULTIVOS | 53 |
| TABLA 12 COMPOSICIÓN QUÍMICA FERTILIZANTE 18-18-18..... | 53 |
| TABLA 13: COMPOSICIÓN QUÍMICA FERTILIZANTE 13-26-6..... | 54 |
| TABLA 14: COMPARACIÓN RESULTADOS HUELLA HÍDRICA PARA CULTIVO DE PAPA..... | 61 |
| TABLA 15: COMPARACIÓN RESULTADOS HUELLA HÍDRICA PARA CULTIVO DE CEBOLLA | 62 |

LISTA DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| ECUACIÓN 1 ECUACIÓN HUELLA HÍDRICA (HOEKSTRA, CHAPAGAIN, ALDAYA, & MEKONNEN, 2011)..... | 19 |
| ECUACIÓN 2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS FAO | 26 |
| ECUACIÓN 3: CÁLCULO HUELLA AZUL | 47 |
| ECUACIÓN 4: CÁLCULO HUELLA VERDE..... | 49 |
| ECUACIÓN 5: CÁLCULO HUELLA GRIS | 52 |
| ECUACIÓN 6: TASA DE APLICACIÓN DE NITRÓGENO..... | 54 |

RESUMEN

Colombia es uno de los países que cuenta con mayor riqueza en términos de biodiversidad y disponibilidad de recursos naturales, dispone de una gran abundancia de fuentes hídricas que permiten abastecer y utilizar el recurso como eje del desarrollo económico, sin embargo, no se cuenta con políticas o programas de desarrollo que permitan sostener el mismo sin que se exceda las presiones por uso, contaminación y /o criticidad.

El presente estudio realizó un análisis comparativo entre el indicador de huella hídrica aplicado al sector agrícola en el departamento de Boyacá, generando así información detallada que permitiera precisar, disponibilidad, demanda, contaminación y alternativas para el uso sostenible del recurso hídrico, todo, a través de la metodología de la FAO para el cálculo de huella hídrica, donde por medio del software CROPWAT 8.0 se puede conocer la huella hídrica azul, verde y gris en la producción de un cultivo de papa y cebolla en los municipios de Samacá y Duitama.

La investigación realizada determinó que para un cultivo de papa y cebolla con un ciclo fenológico entre mayo a septiembre se tienen un indicador de huella hídrica de 494,93 m³/Ton y 591,32 m³/ton respectivamente, siendo el componente gris el que mayor incidencia tiene en el resultado total de dicho indicador.

Con los resultados obtenidos en la investigación se realizó la comparación con el Estudio Nacional De Agua 2014- ENA-, donde se pudo establecer que para el caso de la papa son muy aproximados los datos obtenidos, pero al momento de analizar y comparar los resultados del cultivo de cebolla, hubo diferencias significativas entre ambos, adicionalmente, se formularon alternativas que respondieran a las problemáticas definidas en esta investigación, enfocándose principalmente en aspectos agronómicos y de gobernanza del agua.

Palabras clave: Huella hídrica, sostenibilidad, contaminación, demanda, disponibilidad

ABSTRACT

Colombia is one of the countries that has the greatest wealth in terms of biodiversity and availability of natural resources, has a great abundance of water sources that allow to supply and use the resource as an axis of economic development, however, there are no policies or development programs that allow sustaining it without exceeding the pressures for use, pollution and / or criticality.

The present study carried out a comparative analysis between the water footprint indicator applied to the agricultural sector in the department of Boyacá, thus generating detailed information that would allow us to specify, availability, demand, pollution and alternatives for the sustainable use of the water resource, all, through of the methodology of the FAO for the calculation of the water footprint, where through the Cropwat 8.0 software the blue, green and gray water footprint can be known in the production of a potato and onion crop in the municipalities of Samacá and Duitama.

The investigation determined that for a potato and onion crop with a phenological cycle between May and September, there is a water footprint indicator of 494.93 m³ / ton and 591.32 m³ / ton respectively, with the gray component being the largest incidence has on the total result of said indicator.

With the results obtained in the investigation, the comparison was made with the national water study 2014- ENA-, where it was possible to establish that in the case of the potato the data obtained are very approximate, but at the time of analyzing and comparing the results of the onion cultivation, there were significant differences between the two, in addition, alternatives were formulated that responded to the problems defined in this research, focusing mainly on agronomic and water governance aspects.

Keywords: Water footprint, sustainability, contamination, demand, availability.

INTRODUCCIÓN

Datos mundiales indican que la agricultura es el sector que más consume agua, representado globalmente alrededor del 70% por ciento de toda la extracción, Desde los años sesenta, la producción mundial de alimentos ha tenido que aumentar de manera exponencial en respuesta al crecimiento demográfico mundial, produciendo más alimentos y un mayor uso de recursos hídricos aumento así la huella hídrica para el sector. (FAO, 2002)

La FAO estima que el agua destinada al riego aumentará un 14 por ciento para 2030. Aunque este aumento es muy inferior al registrado en los años noventa, según las proyecciones, la escasez de agua será cada vez mayor en diferentes zonas y regiones del mundo, lo que limitará la producción local de alimentos a nivel global. (FAO, 2002)

En Colombia hay una gran ausencia de regulación en cuanto a la agricultura, lo que permite establecer que se requiere ordenamiento, planificación, innovación y regulación del sector agrícola, esto desde el punto de vista de sostenibilidad del recurso hídrico, buscando así encontrar un equilibrio entre el desarrollo económico y la preservación del recurso. Estudios realizados por diferentes entidades territoriales han establecido que las malas prácticas agrícolas y la ausencia de control en los territorios, ha ocasionado impactos negativos en el agua disminuyendo la cantidad y la calidad del recurso, en el suelo han afectado sus propiedades y en el airea ocasionado contaminación por el arrastre de partículas con trazas de los químicos que son empleados, además de ello, se ha generado un desbalance ecosistémico y un aumento de la barrera agrícola, lo cual pone en la mesa la necesidad de buscar acciones que permita mitigar, corregir o prevenir dichos impactos. (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2010)

Para el estudio a realizar sobre huella hídrica en el sector agrícola se escogió el Departamento de Boyacá debido a que es uno de los principales departamentos agricultores del país, el cual presenta una gran variedad y extensión de cultivos, de acuerdo a las cifras presentadas por el DANE en

2014, La región oriental que incluye a los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Meta y los Santanderes, aporta el 32% de la agricultura nacional. (DANE, 2015)

El objetivo del estudio es determinar a través de indicador de huella hídrica evaluado a cultivos de papa y cebolla de bulbo, las principales afectaciones, demanda, disponibilidad y alternativas de sostenibilidad del recurso hídrico, para así plantear alternativas y posibles soluciones a las problemáticas encontradas, de esta manera, siguiendo como guía la metodología planteada por la FAO, se pretende conocer la demanda de agua que genera los cultivos anteriormente mencionados.

GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades

III 1 Tipo De Investigación

Manejo y planificación del Recurso Hídrico

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es uno de los países con mayor disponibilidad de recursos hídricos renovables, su extensión está cerca de los 2300 km³/ año distribuyéndose a lo largo del territorio nacional, La demanda del recurso en relación a la distribución geográfica está marcada por una disponibilidad baja y una alta densidad demográfica. (Arevalo, Lozano, & Javier, 2011)

Conforme al estudio nacional de huella hídrica, la mayor demanda de agua se encuentra en las áreas hidrográficas de Magdalena-Cauca y Pacífico, zonas geográficas donde está asentada la mayor parte del país, con la menor disponibilidad del recurso, esta situación ha generado, que entidades como el IDEAM, realicen numerosos estudios que permiten brindar información y conocimientos sobre la oferta, la demanda, la calidad, el riesgo, las respuestas hidrológicas a la variabilidad climática, las aguas subterráneas y la huella hídrica. Al igual que indicadores que dan cuenta de las presiones por uso, afectaciones y criticidad de los sistemas hídricos, sentando así la base para la generación de políticas y estrategias de sostenibilidad del recurso.

De acuerdo al avance del Estudio Nacional de Agua – ENA- 2018 el sector agrícola representa el sector productivo con mayor demanda en cuanto a uso del agua, a este se le atribuye el 43% del total, razón por la cual, se debe pensar en prácticas agrícolas que mejoren el aprovechamiento del recurso, buscando disminuir la demanda y la contaminación por dicha actividad. (IDEAM, 2018).

Ese mismo estudio referencia las zonas de nuestro país que presentan los mayores riesgos de desabastecimiento de agua, bien sea por la falta de disponibilidad del recurso, bajas precipitaciones o ausencia de sistemas de abastecimiento, entre ellos se encuentra el departamento de Boyacá siendo el tercero debido a que 40 de sus municipios están en situación de riesgo.

Desde 2014 se ha incluido en el ENA los conceptos de agua verde y huella hídrica verde, para analizar lo referente al aprovechamiento del agua lluvia contenida en el suelo y su relación con los ecosistemas como proveedores y reguladores de servicios ambientales, permitiendo así abrir una puerta de investigación en torno a lo que significa el agua verde y la conservación de ecosistemas en el marco de la gestión territorial, abriendo también la posibilidad de dar respuesta a las necesidades de abastecimiento de muchos municipios que no cuentan con fuentes de agua superficial para su abastecimiento y uso.

121 1 Antecedentes del problema

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO, el sector agrícola es el mayor consumidor de agua dulce en el mundo. El crecimiento poblacional ha aumentado la demanda de alimentos, lo que ha llevado a sistemas de producción donde se extrae el 70% del agua dulce disponible para suplir este requerimiento, ocasionando presión sobre el recurso hídrico. En Colombia, la producción de papa y cebolla de bulbo son unas de las actividades agrícolas más importantes, siendo el departamento de Boyacá el segundo productor nacional de papa y el primero en producción de cebolla de bulbo.

A nivel nacional se han realizado estudios de Huella Hídrica pero en departamentos donde no se realiza producción de los cultivos en cuestión y se encuentra determinante ya que los sistemas de producción tradicional de estos cultivos se realizan con prácticas agrícolas poco sostenibles y uso excesivo de productos de control fitosanitario y fertilizantes, los que al ser arrastrados por escorrentía a los ríos y aguas subterráneas, producen eutrofización y contaminación hídrica, por

tal razón, es preciso realizar un estudio de indicadores de huella hídrica para estas dos líneas productivas que influyen en la economía tanto del Departamento de Boyacá como a nivel Nacional.

122 2 Pregunta de Investigación

¿Cuáles serán los indicadores de huella hídrica (Verde, Azul y Gris), para un cultivo de cebolla de bulbo y otro de papa en los municipios de Duitama y Samaca, ¿Boyacá?

1.3 JUSTIFICACIÓN

El conocimiento de la distribución, estado, dinámica y presiones sobre los sistemas hídricos en cantidad y calidad, constituyen el soporte para la planificación del territorio y la toma de decisiones para determinar su funcionalidad e integralidad en los servicios ecosistémicos, sus potencialidades y restricciones para efectos de aprovechamiento energético, seguridad alimentaria, abastecimiento y uso sectorial (IDEAM, 2018)

La justificación del proyecto se aborda desde tres aspectos fundamentales, La situación de riesgo en la cual se encuentra el Departamento de Boyacá por posible desabastecimiento en varios de sus municipios, sustentado con base a la información suministrada en el avance del estudio nacional de agua 2018, donde por factores como la disponibilidad, bajas precipitación y ausencia de sistemas de abastecimiento (Cobertura), hacen que alrededor de 40 de sus municipios se encuentran en esta situación, lo cual genera la necesidad de contribuir a la planificación y sostenibilidad del recurso en el departamento.

Por otro lado, se tiene la necesidad de evaluar, analizar y generar planes de manejo a los impactos de la agricultura y sus implicaciones directas en cuanto a la demanda del recurso hídrico y contaminación del mismo.

Por último, la información a detallar, permite realizar comparaciones entre los de resultados con estudios previos, donde se ha empleado la metodología de la FAO, pero en la mayoría de los casos al momento de correr el programa con la información hidrometereológica, se trabaja con datos promedios en grandes extensiones de terreno, lo cual ocasiona que la información no represente de manera idónea las características de una determinada región.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 1 Objetivo general

Evaluar los indicadores de huella hídrica en la producción de un cultivo de Cebolla de bulbo ubicado en la Hacienda el Jardín, municipio de Duitama y otro de Papa ubicado en la finca El Tunó, municipio de Samacá, en el departamento de Boyacá.

1.4.2 2 Objetivos específicos

- Determinar el indicador de huella hídrica (azul, verde y gris) para los cultivos de cebolla de bulbo y papa, objeto del estudio.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos de huella hídrica y el Estudio Nacional de Aguas elaborado por el IDEAM, determinando las diferencias en la metodología empleada y los valores para cada componente de la huella hídrica.
- Formular alternativas que mejoren el uso del agua empleada para el riego del cultivo de papa y cebolla de bulbo.

2 MARCOS DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

La disponibilidad natural de agua dulce está dada por la cuantificación hídrica asociada con los procesos del ciclo hidrológico, con su dinámica, distribución espacial y temporal en el territorio. Esta disponibilidad natural está determinada por la ubicación geográfica, características fisiográficas y la variedad de las condiciones climáticas. Esta disponibilidad se ve limitada por condiciones de calidad del agua que son afectadas por las presiones por uso y contaminación de los sistemas hídricos. (Arevalo, Lozano, & Javier, 2011)

La Huella Hídrica fue concebida inicialmente como una herramienta que permitía estimar el contenido de agua oculta en cualquier bien o servicio consumidos por un individuo o grupo de individuos de un país, en analogía de la huella ecológica como concepto que permite analizar el impacto de los hábitos de vida y consumo de la población bajo un escenario de recursos naturales finitos. (IDEAM, 2015)

Actualmente el desarrollo del concepto ha ampliado su rango de aplicación, llegando a ser una herramienta complementaria a las convencionales para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en una cuenca. La huella hídrica se basa en un desarrollo amplio de tres conceptos previos: (IDEAM, 2015)

Agua Verde, Agua Azul y Agua Virtual, los cuales proveen la mayor parte de la base conceptual y metodológica. El concepto de “agua virtual” fue introducido por el profesor Tony Allan a principios de los años noventa y casi una década después se comenzó a reconocer la importancia de este tema, que trascendió desde el ámbito científico al de la política internacional. El contenido de agua virtual se refiere al volumen de agua requerida o contaminada para la producción de un producto o servicio, medida a lo largo de su cadena de suministro. De esta forma, si una nación exporta o importa un producto, se exporta o importa el agua virtual asociada a ese producto. (Rocha, 2016)

A continuación se presenta la Ilustración 1 donde se identifica los tres grandes componentes de la huella hídrica y su relación con la visión tradicional de la gestión del agua

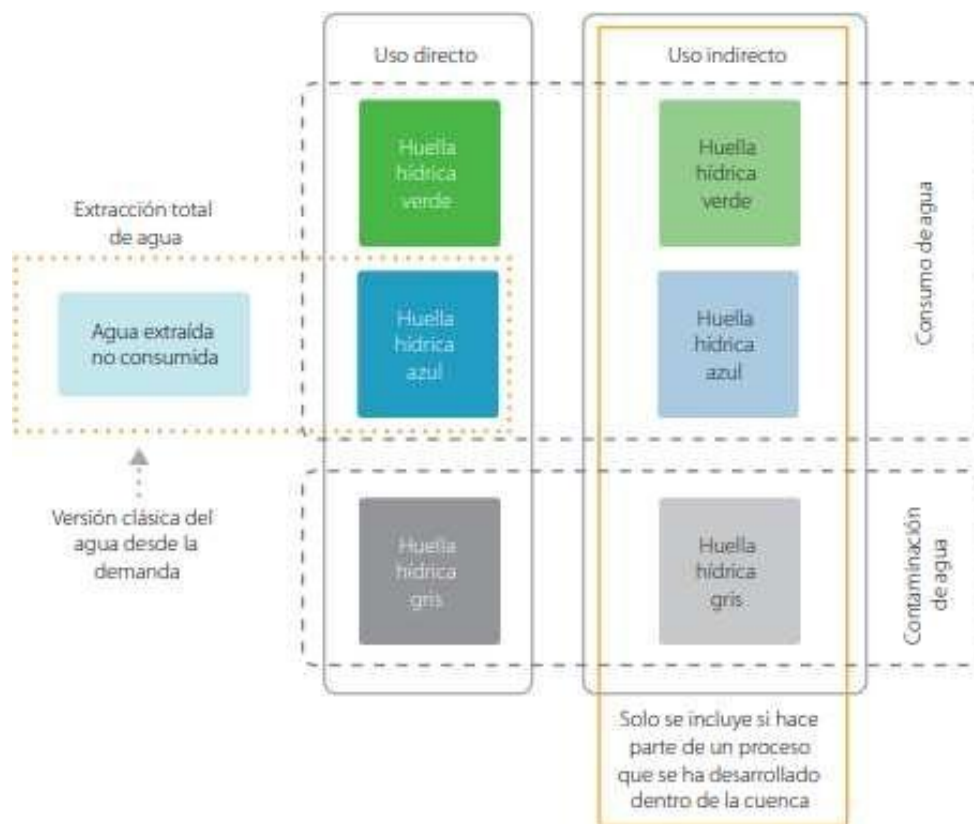


Ilustración 1 Esquema componentes de la huella hídrica en una cuenca

De esta manera, la huella hídrica ofrece una visión innovadora que incorpora los usos indirectos y las huellas verde y gris, asociada al agua verde y al impacto sobre la calidad, respectivamente. Estos componentes permiten identificar el valor agregado que aporta la huella hídrica, ya que han sido excluidos en el análisis tradicional, el cual se ha centrado exclusivamente en el agua azul, gestionada desde la demanda.

2.2 MARCO TEÓRICO

A continuación, se definirá la información requerida y relación con la huella hídrica para el cultivo de papa y cebolla de bulbo en el Departamento de Boyacá.

2.2.1 Huella hídrica

La huella hídrica es el cálculo del volumen de agua utilizada a lo largo de la cadena de producción. Es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuentes superficiales y/o subterráneas, sumados al volumen de agua requerida para diluir los contaminantes generados en la actividad productiva. (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011)

La huella hídrica total se identifica como la suma de tres componentes, los cuales son: huella hídrica azul (irrigación), huella hídrica verde (precipitación) y huella hídrica gris (Contaminada). Expresada así en la siguiente ecuación:

$$HH_{Proc,al} = HH_{Proc,azul} + HH_{Proc,verde} + HH_{Proc,gris} [Volumen/masa]$$

Ecuación 1 Ecuación huella hídrica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011)

Para nuestro caso, la huella hídrica en el sector agrícola se expresa como m^3/ton , lo que equivale a un litro/kg.

Huella hídrica azul

Es un indicador de uso consuntivo de agua llamada azul, es decir, el volumen de agua asociado a una extracción de fuente superficial o subterránea para satisfacer la demanda originada en un proceso. “Uso consuntivo del agua“, se refiere al agua que se evapora y que se incorpora al producto (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011).

Huella hídrica verde

Hace referencia al volumen de agua proveniente de la precipitación que no se pierde por escorrentía superficial o se suma a las aguas subterráneas, pero que se mantiene en la superficie y es aprovechada por la vegetación; es decir es el volumen de agua de lluvia consumida durante un proceso de producción. (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011). Según lo indicado por los autores, se conoce también como precipitación efectiva, variable fundamental para el cálculo de la huella hídrica verde.

Huella hídrica gris

Hace referencia al agua residual generada a través de la cadena de producción del cultivo. Se define como el volumen de agua necesario para asimilar la carga contaminante por parte de un cuerpo receptor, (S.E, 2014), todo esto depende a la normatividad de calidad de agua que esté en vigencia.

Uso de agua como materia prima

Se entiende como aquella que se incorpora en los procesos de transformación como en la industria alimentaria (cárnicos, alimentos y bebidas) en las que el agua es una proporción del producto final (bien de consumo).

Uso de agua como insumo

Aquella que no se incorpora en el bien, pero hace parte de los procesos que requieren de refrigeración en actividades industriales, en el transporte y la decantación de material en la minería o en la industria de celulosa y la producción de papel, como elemento de transferencia de temperatura en procesos tanto de calentamiento como de enfriamiento, en actividades de lavado, o como contenedor de residuos industriales. Cuando se usa como insumo o como materia prima, el agua retorna en mayor o menor proporción al ciclo natural en un periodo de tiempo variable y no necesariamente en el mismo lugar en el que fue extraída. También se considera al sector de hidroenergía un usuario de agua como insumo.

Cadenas de uso de agua:

Es aplicable al uso que se hace del agua en cada una de las etapas de los procesos productivos sectoriales. (IDEAM, 2010a).

Caudal o flujo de Retorno:

Es el volumen de agua que se reincorpora o es devuelto a la red de drenaje de la cuenca como remanente de los volúmenes usados o aprovechados en los procesos productivos de las actividades económicas y en el consumo humano

Presión ambiental:

Se entiende por presión ambiental la contribución potencial de cada agente social o actividad humana (población, industria, agricultura, minería) a las alteraciones del medioambiente por consumo de recursos naturales, generación de residuos (emisión o vertimiento) y transformación del medio físico. Es decir, es la capacidad de generar un impacto ambiental.

2.3 MARCO JURÍDICO

A continuación se presenta la Tabla 1 donde se referencia la legislación vigente relacionada con el tema a tratar en el proyecto.

Tabla 1. Marco legal aplicado al proyecto

| NORMAS Y REGLAMENTACION | | |
|--|------------------------|---|
| TIPO DE NORMA | No | ARTICULOS Y DESCRIPCIÓN DE LA APLICABILIDAD |
| CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA | 1991 | Art.80 El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. |
| LEY | 99 DEL 1993 | Art.10,11,24 Y 29: Prevención y control de contaminación de las aguas |

| | | |
|----------------|---------------------|---|
| DECRETO | | <p>Art.42 Establece que la utilización directa o indirecta de los recursos como lo son la atmosfera, suelo y agua para arrojar, introducir desechos, desperdicios de origen agrícola, minera, industrial de aguas negras o servidas de cualquier origen ya sea de humos, vapores, sustancias tóxicas de origen antropogénico quedarán sujetas a tasas retributivas por la consecuencia nociva de dichas Actividades.</p> |
| | 373 DE 1997 | Uso eficiente y Ahorro del agua |
| | 79 DE 1986 | Conservación y protección del recurso agua |
| | 1541 DE 1978 | <p>Art 28 El derecho al uso de las aguas y de los cauces</p> <p>Art. 104- 106.Ocupación de cauces y permiso de ocupación de cauces</p> <p>Art. 211-219 Control de vertimientos</p> <p>Art. 225 Vertimiento por uso agrícola</p> <p>Art. 231 Reglamentación de vertimientos</p> |
| | 1594 DE 1984 | <p>Art. 22- 23 Ordenamiento del recurso agua</p> <p>Art. 29 Usos del agua</p> <p>Art. 37- 50 Criterios de calidad del agua</p> <p>Art. 60-71 Vertimientos de residuos líquidos</p> <p>Art. 22- 23 Normas de vertimientos</p> |
| | 2811 DE 1974 | <p>Art. 77 a 78 Clasificación de aguas.</p> <p>Art. 80 a 85. Dominio de las aguas y cauces.</p> <p>Art. 86 a 89. Derecho a uso del agua.</p> <p>Art.134 a 138. Prevención y control de contaminación.</p> <p>Art. 149. Aguas subterráneas.</p> <p>Art.155. Administración de aguas y cauces.</p> |
| | 3930 DE 2010 | <p>Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III -Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.</p> <p>Modificado parcialmente por el decreto 4728 de 2010.</p> <p>Art.13 Uso agrícola</p> |

| | | |
|---------------------------|----------------------------|---|
| | | Art.40 Control de contaminación por agroquímicos. |
| RESOLUCION | 0865 DE 2004 | Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones 3. Cálculo de la oferta hídrica 3.3 Relación lluvia- Escorrentía |
| POLÍTICAS PUBLICAS | CONPES 1750 DE 1995 | Políticas de manejo de las aguas |

FUENTE: AUTORES

2.4 MARCO GEOGRÁFICO

El Departamento de Boyacá está situado en el centro del país, en la cordillera oriental de los Andes; localizado entre los 04°39'10'' y los 07°03'17'' de latitud norte y los 71°57'49'' y los 74°41'35'' de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 23.189 km² lo que representa el 2.03 % del territorio nacional. Limita por el Norte con los departamentos de Santander y Norte de Santander, por el Este con los departamentos de Arauca y Casanare, por el Sur con Meta y Cundinamarca, y por el Oeste con Cundinamarca y Antioquia. (Codazzi, 2018)



Ilustración 2: Ubicación departamento de Boyacá

En el departamento de Boyacá se destacan en orden ascendente tres áreas pluviométricas : el altiplano central, de menor lluviosidad, con promedios anuales del orden de 1.000 mm, y las vertientes altas en ambos flancos de la cordillera Central, con promedios anuales inferiores a 2.500 mm; el altiplano central presenta un régimen de lluvias bimodal caracterizado por dos períodos que se presentan entre abril y junio, y octubre y noviembre; el resto del año se considera como período seco aun cuando se presentan lluvias aisladas. Por lo variado de su relieve se presentan todos los pisos térmicos desde el nival, en la sierra nevada del Cocuy, hasta el cálido, en el Territorio Vásquez y la vertiente oriental de la cordillera Oriental. (Codazzi, 2018)

2.5 MARCO DEMOGRÁFICO

En el departamento de Boyacá las diferentes provincias del departamento de acuerdo a las variables de área sembrada en cultivos transitorios sobresalen los cultivos de Papa en la provincia Centro y Cebolla de cebolla de bulbo, en las provincias del Tundama y Sugamuxi. Como principal cultivo transitorio en el departamento y reportado por 82 municipios lo es el cultivo de la papa, la variación en cuanto al comportamiento de área sembrada y área cosechada para el año 2018 en el total de provincias del departamento fue negativa por los bajos precios del producto en el mercado para el año 2017. (Boyaca, 2018)

Los productores de papa en Boyacá aprovechan durante todo el año las condiciones de clima y microclima predominantes en cada municipio, todo esto dependiendo del agua lluvia, pues la mayoría de los productores no dispone de agua para riego. Cabe resaltar que la mayoría de los productores cultiva en promedio media hectárea de papa.

La mayor área sembrada en el departamento de Boyacá en papa se encuentra en la provincia Centro, con el reporte de 24 municipios siendo Tunja el primer municipio con 4.921 Hectáreas en el año, seguido por los municipios de Samacá, Ventaquemada, Arcabuco y Toca. (Boyaca, 2018).

Del total de la producción en el departamento de Boyacá, en el cultivo de papa, que corresponde a 884.994 Toneladas, la provincia de Centro aporta el 55,8% del total de la producción

departamental, seguido por las provincias de Occidente, Márquez, Tundama, Sugamuxi con 14,1%, 9,5%, 8,6%, 6,8% respectivamente y el resto de las provincias en el departamento aportan el 5,2% de la producción de papa en el año 2017. (Agropecuario, 2018)

El cultivo de cebolla bulbo se convierte en el tercer cultivo con mayor área sembrada en el departamento con 5.280 Ha, las cuales se encuentran en las provincias de Centro, Tundama, Sugamuxi y Ricaurte. La especialización del cultivo, implica prácticas de monocultivo que implican deterioro del recurso suelo, con presencia de trashumancia de productores de regiones como Cundinamarca, quienes acceden a los predios en calidad de arriendo. (Agropecuario, 2018)

2.6 ESTADO DEL ARTE

El análisis de huella hídrica en los últimos años ha significado un herramienta de toma de decisiones y generación de planes enmarcados en la sostenibilidad, esto debido a la información que proporciona, siendo un indicador que se utiliza para dar a conocer el volumen total del agua dulce usado para la producción de un bien o servicio producido por una empresa, y la fracción de agua contaminado durante el proceso la cual es retornada a los cuerpos de agua ya sea por vertimientos, escorrentía, infiltración u otros. En este indicador se tiene en cuenta el uso directo o indirecto del agua, se establece el consumo, la evaporación y contaminación y se determina el aprovechamiento del recurso natural y el impacto que tiene sobre los ecosistemas.

En Colombia El Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales - IDEAM-entidad encarga del manejo de la información científica, hidrológica, meteorológica y todo lo relacionado con el medio ambiente en Colombia, publica cada 4 años el informe nacional de agua, un estudio que propende por contribuir a los lineamientos de la Política para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, en la medida que se constituye como información vital para el conocimiento y evaluación del estado, dinámica, tendencias de los componentes del ciclo del agua y las presiones que se ejercen sobre su disponibilidad y sobre la calidad por uso y contaminación respectivamente. (IDEAM, 2015).

En el informe entregado en 2014 por parte del IDEAM, se incluyó información relacionada con el cálculo de la huella hídrica para los diferentes sectores económicos del país. Para la determinar del indicador en el sector agrícola se basaron en la comparación entre la oferta disponible y la demanda, para una región determinada en un periodo de tiempo establecido.

La demanda hídrica del sector agrícola se enfocó en estudiar los requerimientos de agua en los cultivos, para ello se analiza su interrelación con las variables climáticas y de suelos para toda Colombia. El requerimiento hídrico de los cultivos se determina a partir del cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y del balance de agua en el suelo, definiendo mes a mes, el agua que el suelo retiene proveniente de la lluvia o del riego y que el cultivo puede extraer en su zona radicular, para ello consideraron lo siguiente, la evapotranspiración de los cultivos ET_a es proporcional a la evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o , ajustada con un factor de cultivo k_c (adimensional) que representa la variación de la evapotranspiración de cada cultivo con respecto al cultivo de referencia. (FAO, 2006)

Adicionalmente se ajusta la evapotranspiración de los cultivos con un factor de estrés hídrico K_s según la ecuación

$$ET_a = k_s * k_c * ET_o.$$

Ecuación 2 Evapotranspiración de los cultivos FAO

En nuestro país también se desarrolló el estudios nacionales de huella hídrica evaluado específicamente al sector agrícola, Para el cálculo del indicador se aplicó la metodología estándar propuesta por el Water Footprint Network.

Lo primero que se hizo en el estudio fue definir la escala temporal a estudiar, ante lo cual se concluyó que lo más conveniente sería analizar la producción agrícola nacional a nivel anual, tomando como año de estudio el 2008, esto debido a la disponibilidad de los datos.

El cálculo de la Huella Hídrica por producto y área geográfica delimitada se realizó a partir de información generada de tres grandes bloques: Información de Producción, Información Geográfica e Información Agroclimática. (Arevalo, Lozano, & Javier, 2011)

Para la información de producción se contaba con datos del ministerio de agricultura y desarrollo rural y las bases de datos del Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial, publicado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, También fueron incluidos datos de los más de 500 distritos de riego existentes en Colombia.. (Arevalo, Lozano, & Javier, 2011)

La fuente de Información Geográfica ha sido la información oficial de división geopolítica de Colombia (Departamentos y Municipios) generada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. En cuanto a la información de división hidrológica de Colombia se contó con los planos oficiales de división en Área Hidrográficas, Zonas Hidrográficas y Subzonas Hidrográficas de Colombia, suministrado por IDEAM.

Por ultimo La Información necesaria para la caracterización agroclimática de Colombia fue obtenida del modelo distribuido generado por la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente de la sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia y que está incorporado al HidroSIG, sistema de información geográfica que permite realizar estimaciones y análisis de variables hidrológicas, climáticas y geomorfológico.

3 METODOLOGÍA

Como guía principal empleada para el desarrollo de esta investigación y realizar la comparación entre indicadores de huella hídrica en la producción de los cultivos de Papa y Cebolla de Bulbo en las fincas a desarrollar y los municipios específicos, se utilizará la metodología estándar propuesta por el *WaterFootprint Network*. (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011). Teniendo en cuenta los procedimientos establecidos en dicho manual, se estimó cada uno de los componentes de huella hídrica total utilizados en el proceso productivo de los cultivos a evaluados.

Los tres componentes básicos para el cálculo de la Huella Hídrica son la **Huella Hídrica Azul**, **Huella Hídrica Verde** y **Huella Hídrica Gris**: previamente definidas en el marco teórico

3.1.1 Variables utilizadas para el cálculo de los indicadores de huella hídrica total de los cultivos de Papa y Cebolla de Bulbo

Huella Hídrica Azul:

Requerimientos de riego del cultivo (CWU riego): Volumen de agua que requieren los cultivos tomando una base de cálculo de un año proveniente de riego (CWU riego). Cuando la lluvia no cumple con el requisito de agua de los cultivos, ésta es suplida por el agua de riego. (S.E, 2014)

Para determinar la cantidad de agua que necesita cada cultivo anualmente proveniente de riego (CWU riego), se deben restar los requerimientos hídricos de los cultivos con el valor de la precipitación efectiva (Barros, 2012)

Requerimiento hídrico del cultivo (CWU): Definido como el inverso a la evapotranspiración del cultivo, es decir, la cantidad de agua que debe suministrarse a la planta para compensar las pérdidas de agua provocadas por la evapotranspiración con el fin de lograr un adecuado crecimiento y desarrollo. En términos numéricos es equivalente a la evapotranspiración del cultivo (ETc). (Barros, 2012).

El requerimiento hídrico de los cultivos a evaluar, se estimarán a partir de datos climáticos (temperatura, velocidad del viento, etc.) y las características de los cultivos. Para estimar las necesidades hídricas de los cultivos se empleará el modelo CROPWAT 8.0 de la FAO.

Evapotranspiración potencial o de referencia (E_{To}): La FAO la define como la suma de las pérdidas de agua por transpiración de la planta con aquellas producidas por el proceso de evaporación del suelo de una superficie cultivada. (Barros, 2012)

Huella Hídrica Verde:

Precipitación efectiva (P_{ef}): La precipitación efectiva se define como la cantidad total de agua precipitada que no se pierde a través de escorrentía superficial ni por percolación profunda, es decir queda retenida por el suelo permaneciendo disponible para el aprovechamiento de la planta (FAO, 2006)

Huella Hídrica Gris:

Aplicación de productos químicos (Fertilizantes, pesticidas e insecticidas): Es el cálculo de la cantidad de fertilizantes utilizados en el proceso productivo del cultivo, teniendo en cuenta la frecuencia de aplicación y su composición química, información obtenida a través de datos locales.

Fracción de lixiviación: Corresponde al porcentaje de las sustancias químicas aplicadas a los cultivos que se infiltran y percolan hasta llegar a los cuerpos de agua dulce. (Barros, 2012)

Debido a la falta de datos específicos en cada cultivo sobre el porcentaje del químico aplicado que lixivia hasta alcanzar agua dulce, se asumirá el 10% para todos los fertilizantes, valor utilizado por Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, (2011) Esto teniendo en cuenta que cada fertilizante posee una movilidad diferente dentro del suelo, la cual se ve influenciada por condiciones ambientales y de manejo. (Barros, 2012)

Concentración natural de contaminantes: Hace referencia a los niveles de contaminantes presentes de manera natural en los cuerpos receptores de agua. (Barros, 2012)

Concentración legal de contaminantes: Corresponde a los niveles máximos permitidos de concentración de contaminantes que la ley establece y que pueden estar presentes en los cuerpos de agua. (Barros, 2012)

3.2 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

Para la presente investigación, se siguió la metodología desarrollada y presentada en el Manual de Huella Hídrica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011). Esta metodología está conformada por 4 fases.

Tabla 2. Fases de la metodología

| FASE I | FASE II | FASE III | FASE IV |
|--------------------------------------|----------------------------------|---|--------------------------|
| Determinación de alcance y objetivos | Cuantificación de huella hídrica | Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica | Formulación de Respuesta |

FUENTE: (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011)

3.2.1 Ubicación de áreas de estudio

A continuación, se presenta las características de las zonas donde se realizó el estudio:

Tabla 3. Características área de influencia del proyecto

| MUNICIPIO | SAMACA | DUITAMA |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Vereda | Gacal | San Lorenzo Abajo |
| Finca | El Tunó | Hacienda El Jardín |
| Coordenadas Geográficas | 05.4547° N -73.4644° W | 05.8478° N -73.0308° W |
| Altitud | 2912 m.s.n.m | 2679 m.s.n.m |
| Cultivo | Papa | Cebolla de Bulbo |
| Variedad | ICA única | Taqui |
| Área sembrada | 0.64 Ha | 0.64 Ha |
| Propietario | Jesús Chavarría | Andrés Buitrago |

FUENTE: AUTORES

3.3 GENERALIDADES DE LOS CULTIVOS

3.3.1 Papa (*Solanum tuberosum*)

El cultivo de papa requiere una textura del suelo fina y una profundidad efectiva superior de 40 cm, lo cual permite el desarrollo apropiado de las raíces. Además, requiere de una porosidad del 50% con una distribución equilibrada de macroporos, mesoporos y microporos, garantizando así un nivel adecuado de almacenamiento de agua y aireación en la zona radicular de la planta. De igual manera, debe presentar un contenido de materia orgánica superior al 5%, lo cual disminuye el riesgo de erosión y aumenta la actividad biológica del suelo manteniendo así la sanidad del suelo (Moreno, Cesan Lasso, & Valbuena Benavides, 2014). El pH del suelo juega un papel importante en el desarrollo del cultivo. Éste se establece mejor entre 5,5 a 7,0; es de resaltar que en suelos con pH inferior a 5,5 pueden aumentar los niveles de aluminio y manganeso hasta alcanzar niveles tóxicos para la planta. De igual manera puede afectar la capacidad de absorción de calcio y magnesio. Por otro lado, en presencia de pH superior a 7,5 se limita la capacidad de absorción de hierro, manganeso y zinc. (Santos Rojas & Orena Alvarado, 2014)

Exigencias agroecológicas : En Colombia se cultiva papa en latitudes que van desde los 2.000 hasta los 3.500 m.s.n.m. La altura del cultivo es determinante en la temperatura ambiente, y sus efectos en el cultivo van desde problemas en el desarrollo de la planta hasta efectos negativos en los rendimientos del cultivo. Las temperaturas óptimas se encuentran entre los 12 y los 14 °C. En lo referente al suministro de agua, el cultivo de papa requiere lluvias bien distribuidas de 600 a 800 mm en el año. (Santos Rojas & Orena Alvarado, 2014)

Ciclo Fenológico del cultivo de papa.

En el ciclo fenológico de la papa se pueden distinguir cuatro fases:

Fase de Emergencia: Es el periodo que transcurre entre la siembra y la aparición de los brotes en el surco.

Fase vegetativa: periodo entre la emergencia y la iniciación de la tuberización.

Fase de tuberización o llenado: Periodo entre la iniciación de la tuberización y el máximo desarrollo del follaje. Para muchas variedades se considera que este periodo coincide con el inicio de la floración.

Fase de madurez: Periodo entre el máximo desarrollo del follaje y la senescencia total.

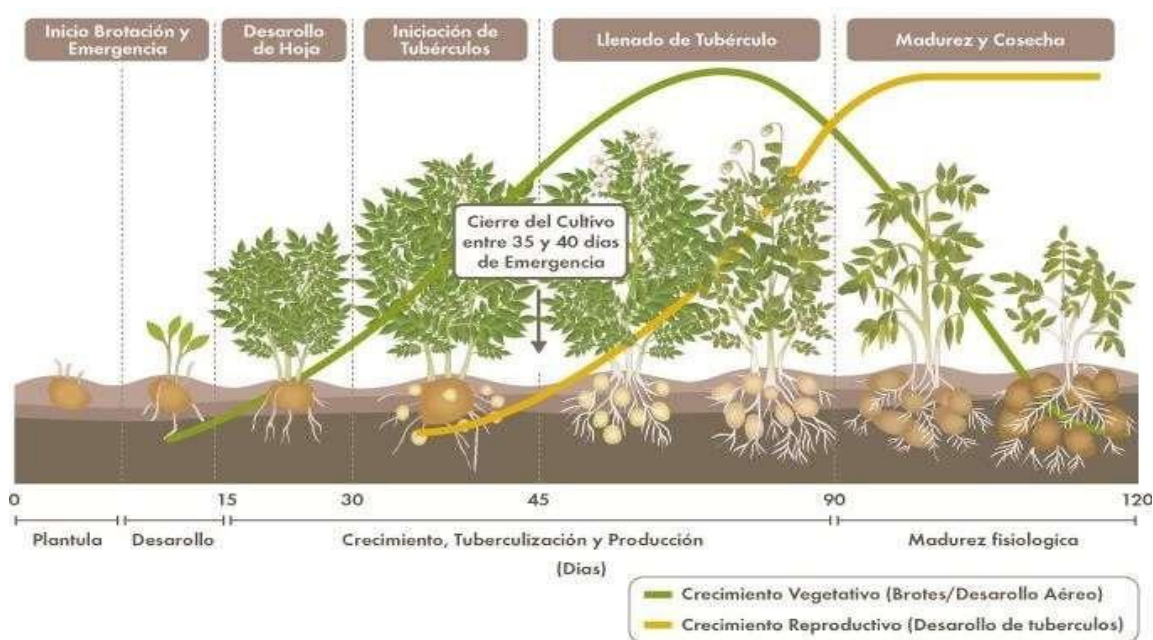


Ilustración 3 Etapas Fenológicas Cultivo de Papa (Moreno, Cesan Lasso, & Valbuena Benavides, 2014)

3.3.2 Cebolla cabezona (*Allium cepa*.)

Suelos

La cebolla cabezona puede ser cultivada en diferentes tipos de suelo, procurando contar con las siguientes características: textura liviana franco arcillosa (FAR) a franco arenosa (FA), buena retención de humedad y pH ligeramente ácido a neutro (6 a 6,8). (Corpoica, 2016)

Los suelos de texturas livianas o con alto contenido de arena, buen contenido de materia orgánica y buena estructura, permiten un mejor crecimiento del bulbo; caso contrario ocurre cuando la textura del suelo es arcillosa o pesada. Así mismo, al inundarse los lotes de cultivo, el oxígeno disminuye en el suelo, dando mayor posibilidad a que se presenten microorganismos anaeróbicos que, por lo general, son los más perjudiciales para las plantas; además el suelo se convierte en un

medio propicio para la propagación de plagas y enfermedades, lo cual afecta de manera directa al cultivo y a la producción. (ICA, 2016)

Clima

En cuanto a las condiciones climáticas, la cebolla se adapta en un amplio rango altitudinal que va desde los 0 a 2.800 metros sobre el nivel del mar (msnm) y temperatura de 28 a 12 °C, con temperaturas óptimas de 12 a 23 °C. Es un cultivo muy sensible a condiciones de sequía y temperaturas elevadas. (Corpoica, 2016)

Cabe indicar que el ciclo del cultivo se hace más largo cuando se adelanta en zonas más frías, como Bogotá, Boyacá o Nariño, en donde la cosecha de las cebollas se realiza a los 150 días después del trasplante, mientras que en el Valle del Cauca se da a los 110 días y en el sur del Atlántico, en donde las temperaturas son más elevadas, entre los 90 y 100 días después del trasplante. (PRONATTA, El cultivo de la cebolla cabezona blanca, 2002)

Preparación del terreno para la siembra

Esta labor previa a la siembra es de gran importancia, debido que de ella depende en gran parte la producción, por lo que se deberá adelantar el análisis de suelos y tener en cuenta los requerimientos físicos y químicos del cultivo, para así definir las labores de preparación del lote y las enmiendas y correctivos a aplicar al suelo; no es recomendable establecer cultivos de cebolla de bulbo en terrenos nuevos, en razón a que demandan mayor cantidad de labores y probablemente presenten mayor incidencia de malezas. Por otra parte, es muy importante evitar procesos de compactación del suelo utilizando en lo posible herramientas como azadones y palas o maquinaria e implementos livianos; en igual sentido, la humedad del suelo al momento de la preparación deberá ser la adecuada; es recomendable realizar la arada a una profundidad de 30 a 35 centímetros y orientada en el mismo sentido en el que se construirán los canales para el riego o el drenaje del lote, pues con esto se evitará la formación de depresiones transversales que podrían acumular agua y, por consiguiente, ocasionar la pudrición de las raíces, afectando el desarrollo del cultivo. Finalmente, se construyen las camas o eras, teniendo en cuenta las distancias de siembra, la pendiente del terreno y la fertilidad del suelo. (Corpoica, 2016)

Producción de plántulas en vivero o almácigo

La propagación o producción de plántulas para la siembra de la cebolla cabezona se realiza mediante el método asexual, utilizando bulbos o por el método sexual a partir de semilla, siendo este último el más utilizado en el caso de variedades o híbridos.

Para la producción de plántulas a partir de semillas, se debe contar con un semillero o almácigo, el cual debe ubicarse cerca al sitio de siembra definitivo, en un lugar ventilado y con buena iluminación, además de contar con agua suficiente y de buena calidad; así mismo, es importante disponer de un sustrato fértil, de textura franca a franca arcillosa, bien drenado y desinfectado. Durante la etapa de vivero, se deberá adelantar un plan de fertilización, riego y manejo integrado de plagas encaminado a la producción de plántulas sanas y vigorosas; es importante que el productor lleve un registro de todas las actividades realizadas. (Corpoica, 2016)

Una vez desinfectado el sustrato del semillero, se marcan los surquillos donde irá la semilla, usando una tabla marcadora provista de salientes ubicados cada 1,5 centímetros; así se logrará una distancia de siembra uniforme y estimada de 25 gramos de semilla por metro cuadrado; esto con el fin de evitar que las plántulas se quemen o crezcan muy débiles y delgadas haciéndose más susceptibles a posibles ataques de hongos; para el establecimiento de una hectárea de cultivo, se requiere una cantidad de 6 a 7 libras de semilla.

Por último, dos semanas antes del trasplante se acostumbra cortar la tercera parte superior de las plántulas a fin de estimular un mayor enraizamiento, como el surgimiento de nuevas hojas; esta práctica algunos la realizan el día del trasplante, así como el corte de parte de las raíces para estimular el brote de las raíces definitivas.

Con la orientación del asistente técnico y de cuidadosas y continuas inspecciones a los semilleros se pueden detectar a tiempo posibles ataques de plagas y enfermedades, las cuales deberán ser controladas adecuadamente y de manera inmediata. (PRONATTA, El cultivo de la cebolla cabezona blanca, 2002)

Trasplante

El trasplante al sitio definitivo se realiza cuando las plántulas en el vivero o almácigo hayan alcanzado un grosor de 0,5 centímetros y una altura de 12 a 15 centímetros y presente n mínimo cuatro hojas; este estado de desarrollo se alcanza aproximadamente a los 40 días después de la germinación. El día anterior al trasplante se deberá regar para humedecer el almácigo, con el fin de no causar daño a las plántulas durante la extracción, en especial a la raíz; al momento del trasplante las plántulas deberán protegerse de la luz solar para evitar la deshidratación.

Al día siguiente del trasplante se adelantará la aplicación de riego para reducir la ocurrencia de daños por estrés hídrico; cabe indicar que al momento del trasplante se deberán descartar las plántulas que presenten daños por deficiencias nutricionales o cualquier otro daño. (Corpoica, 2016)

De otra parte, es recomendable durante los días soleados adelantar el trasplante a partir de las 3 de la tarde y hasta donde sea posible contar con visibilidad; durante épocas lluviosas o de alta nubosidad se puede realizar desde las primeras horas de la mañana; previamente a la siembra se debe aplicar riego al lote, repitiéndolo de manera suave al día siguiente. Las plántulas se depositan en el suelo ahoyado, dándosele un pequeño apretón para procurar un buen contacto de las raíces con el suelo húmedo, lo que permitirá el inicio de la brotación de nuevas raíces y hojas. Si se ha hecho una buena preparación de suelo y se dispone de buen riego, no es necesario ahoyar el suelo; basta con poner las plántulas en el suelo con una mínima presión; esta práctica es común en zonas con mucha experiencia en el cultivo. (PRONATTA, El cultivo de la cebolla cabezona blanca, 2002)

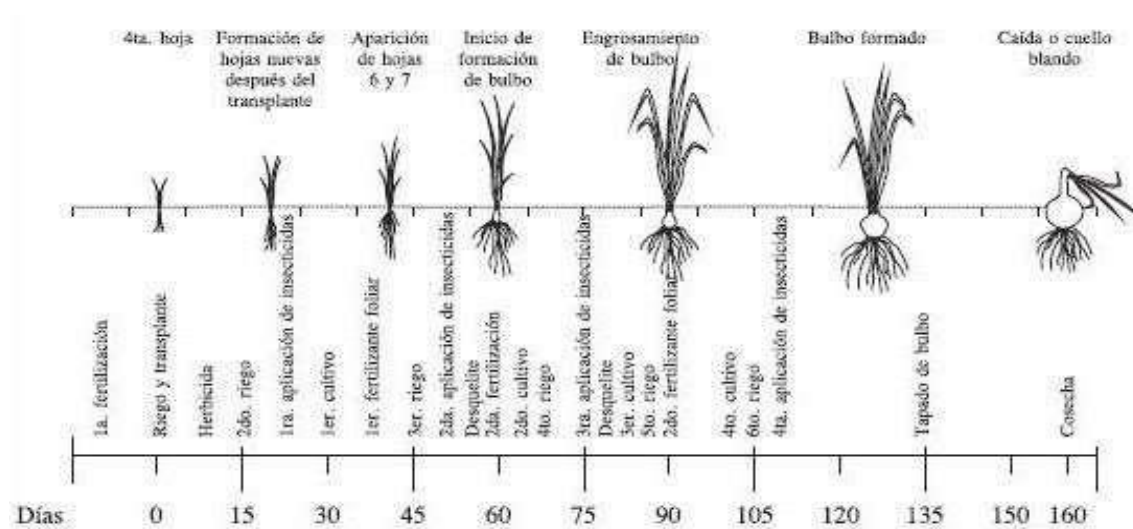


Ilustración 4 Etapas Fenológicas del cultivo de Cebolla de bulbo (ICA, 2016)

3.6 Cuantificación de la huella hídrica para el cultivo de Cebolla de Bulbo en la Hacienda El Jardín y para el Cultivo de Papa en la Finca El Tuno, mediante el modelo Cropwat 8.0

Teniendo en cuenta el manual de evaluación de la huella hídrica desarrollado por (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011), la estimación la huella hídrica total del proceso del cultivo de Cebolla de Bulbo y del cultivo de Papa (*WFproc*) es la suma de los componentes verde, azul y gris.

3.4 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS

3.4.1 Modelo Cropwat 8.0

Es un programa informático creado por la FAO en el año 2010, que utiliza el método Penman-Monteith como herramienta principal para determinar la evapotranspiración del cultivo en estudio (ET), las necesidades hídricas y las necesidades de riego del mismo, en base a datos climatológicos, del suelo y del cultivo. (Cedula, 2013)

CROPWAT 8.0 también se puede utilizar para evaluar las prácticas de riego de los agricultores y para estimar el rendimiento de los cultivos, tanto en condiciones de secano y de regadío. (FAO, 2010)

3.4.2 Información climatológica

Los datos climatológicos que se utilizaran para el manejo del programa CROPWAT 8.0 y que la fórmula FAO Penman- Montheit requiere en promedios mensuales son en su orden: temperatura máxima y mínima, humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) e insolación (h). los datos de precipitación P(mm), se tomaron los valores totales mensuales, estos datos fueron suministrados por las estaciones meteorológicas de Surbatà-Bonza y Teatinos ubicadas en los municipios de Duitama y Samaca del departamento de Boyacá. Como el ciclo fenológico de los dos cultivos terminó en el mes de septiembre, los datos climatológicos y de precipitación de los meses de octubre a diciembre fueron los correspondientes al año 2018 de cada municipio ya que el modelo CROPWAT 8.0 requiere datos promedio y totales de un año.

Los datos de insolación en horas, fueron tomados del mapa de brillo solar creado por el IDEAM, el cual muestra mediante convenciones de colores, la variación que va desde el blanco hasta el rojo que indica una mayor intensidad, se ilustra una aproximación de promedios anuales diarios del número de horas de sol y brillo solar sobre el territorio colombiano.

Tabla 4 Datos Meteorológicos del Municipio de Duitama

| Mes | Temp Min °C | Temp Max °C | Humedad (%) | Viento (m/s) | Insolación (horas) |
|------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------------|
| Enero | 4.9 | 22.9 | 80 | 1.5 | 11 |
| Febrero | 8.2 | 24.3 | 67 | 1.5 | 10.2 |
| Marzo | 9.8 | 22.1 | 76 | 1.5 | 8.2 |
| Abril | 9.8 | 22 | 77 | 1.5 | 8.3 |
| Mayo | 8.9 | 21.5 | 78 | 1.5 | 8.6 |
| Junio | 8 | 21 | 75 | 1.5 | 8.9 |
| Julio | 6.4 | 21.4 | 71 | 1.5 | 10.1 |
| Agosto | 6.4 | 20.7 | 74 | 1.5 | 9.6 |
| Septiembre | 6 | 21.9 | 76 | 1.5 | 10.4 |
| Octubre | 9.2 | 21.6 | 77 | 1.5 | 8.3 |
| Noviembre | 9.8 | 22.4 | 76 | 1.5 | 8.3 |
| Diciembre | 5.2 | 22.3 | 89 | 1.5 | 10.6 |

Fuente: IDEAM

Tabla 5 Datos Meteorológicos del Municipio de Samacá

| Mes | Temp Min °C | Temp Max °C | Humedad (%) | Viento (m/s) | Insolación (horas) |
|------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------------|
| Enero | 9.3 | 19 | 81 | 2 | 6.5 |
| Febrero | 9.6 | 20.9 | 79 | 2 | 7.6 |
| Marzo | 11.6 | 19.9 | 80 | 2 | 5.7 |
| Abril | 10.9 | 20 | 85 | 3 | 6.3 |
| Mayo | 10.9 | 19.6 | 85 | 2 | 6.1 |
| Junio | 11.5 | 18.5 | 88 | 2 | 4.9 |
| Julio | 8.7 | 18 | 86 | 3 | 6.6 |
| Agosto | 7.8 | 17.5 | 80 | 2 | 6.8 |
| Septiembre | 9.4 | 18.8 | 81 | 3 | 6.6 |
| Octubre | 10.2 | 19.7 | 81 | 2 | 6.5 |
| Noviembre | 10.5 | 19.9 | 81 | 3 | 6.4 |
| Diciembre | 7.9 | 19.7 | 76 | 2 | 7.8 |

Fuente: IDEAM

Tabla 6 Precipitación total mensual Municipio de Duitama

| Mes | P(mm) |
|------------|-------|
| Enero | 22.2 |
| Febrero | 40.3 |
| Marzo | 192.8 |
| Abril | 138.8 |
| Mayo | 104.1 |
| Junio | 19 |
| Julio | 30.6 |
| Agosto | 51 |
| Septiembre | 72.4 |
| Octubre | 79.2 |
| Noviembre | 124.8 |
| Diciembre | 6.4 |

Fuente: IDEAM

Tabla 7 Precipitación total mensual Municipio de Samacá

| Mes | P(mm) |
|------------|-------|
| Enero | 20.4 |
| Febrero | 8.6 |
| Marzo | 85 |
| Abril | 146.5 |
| Mayo | 142.7 |
| Junio | 191.5 |
| Julio | 97.8 |
| Agosto | 93.3 |
| Septiembre | 80 |
| Octubre | 196.8 |
| Noviembre | 96.1 |
| Diciembre | 16 |

Fuente: IDEAM

3.4.3 Datos empleados para el cálculo de la huella hídrica

Con la finalidad de conocer los coeficientes hídricos propios de los cultivos de Cebolla y Papa, para así poder hallar la huella hídrica azul, es necesario en primera medida conocer las siguientes características:

- **Fecha de siembra**

Teniendo en cuenta este dato junto con la duración de las etapas de crecimiento del cultivo de papa, le permite al modelo Cropwat 8.0 poder calcular la fecha de cosecha del cultivo. (FAO, 2010), La fecha de siembra del cultivo de Papa fue el día 12 de mayo y el de Cebolla Cabezona, el día 29 de mayo de 2019.

- **Etapas de crecimiento:**

Según la (FAO, 2010), las etapas de crecimiento corresponden a la duración en días de las cuatro etapas del ciclo de un cultivo; estas etapas son: inicial, desarrollo, mediados de temporada y etapa final o de cosecha.

Los valores de duración en días de las etapas de crecimiento para el cultivo en estudio fueron tomados de la publicación de la serie de FAO Riego y Drenaje 56, incluye duraciones generales para las cuatro etapas de crecimiento de distintos cultivos, así como la duración total de la temporada de crecimiento de cada cultivo, para distintos tipos de clima y diferentes localidades. (FAO, 2006). El valor tomado de duración en días de cada etapa de crecimiento del cultivo se muestran en la Tabla 8

Tabla 8 Duración en días de cada etapa de crecimiento

| Etapas de Crecimiento | Cebolla | Papa |
|-----------------------|------------|------------|
| Inicial | 20 | 25 |
| Desarrollo | 45 | 30 |
| Medio | 20 | 45 |
| Final | 15 | 30 |
| Total | 100 | 130 |

Fuente: (FAO, 2006)

- **Coefficiente del cultivo (Kc)**

Este es un valor que depende del tipo de cultivo y su fase de desarrollo. Debido a las variaciones en las características propias del cultivo durante las diferentes etapas de crecimiento, Kc cambia desde la siembra hasta la cosecha. La Tabla 9 presenta, según el Estudio FAO Riego y Drenaje 56, en forma generalizada, valores típicos de **Kc_{ini}**, **Kc_{med}** y **Kc_{fin}** correspondientes a distintos cultivos, para el caso de estudio se tomaron los valores para cebolla y papa los cuales fueron los siguientes:

Tabla 9 Valores del coeficiente único del cultivo, Kc

| Cultivo | Kc ini | Kc med | Kc fin |
|----------------|--------|--------|--------|
| Cebolla | 1.0 | 1.0 | 0.3 |
| Papa | 0.5 | 1.15 | 0.75 |

Fuente: (FAO, 2006)

- **Factor de respuesta de la productividad (KY)**

Establecido como el factor que indica como la productividad del cultivo va disminuyendo según disminuye la ETc, esto como resultado a la falta de agua. Los valores de factor de respuesta de la productividad (Ky) fueron estimados a partir de la base de datos del programa Cropwat 8.0, ya que no hay valores locales en los cultivos, para el caso de la cebolla y la papa se obtuvo un Factor de respuesta de **1,1**.

- **Fracción de agotamiento hídrico (p)**

Corresponde a la fracción promedio del agua disponible total en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de que el cultivo presente estrés hídrico (Barros, 2012). Los valores de factor de fracción de agotamiento hídrico en el cultivo (p), fueron estimados por el programa Cropwat 8.0, ya que no hay valores locales en los cultivos.

- **Rendimiento de los cultivos (Y):**

El rendimiento del cultivo se calculó en toneladas cosechadas dividido entre la superficie en metros cuadrados en que fue producido (Ton/m^2) y en toneladas cosechadas por hectárea (Ton/Ha). Los datos utilizados para el cálculo del rendimiento del cultivo fueron suministrados al momento de finalización de las etapas fenológicas de los cultivos (Cosecha).

Tabla 10 . Rendimiento Cultivos

| Cultivo | Cebolla | Papa |
|-------------------|------------------------|-----------------------|
| Área Cultivo (Ha) | 0,64 | 0,64 |
| Bultos/Ha | 625 | 688 |
| Peso Bulto (Kg) | 50 | 50 |
| Kilogramos/Ha | 31.250 | 34.400 |
| Ton/Ha | 31,25 | 34,4 |
| Ton/ m^2 | 31.25×10^{-4} | 34.4×10^{-4} |

Fuente: Autores

Los cálculos para la determinación de los rendimientos de los cultivos se expresan a continuación:

- **Cálculo Rendimientos:**

Primero se calculó el número de bultos de cebolla y papa producidos por hectárea, en este caso se proyectan al área de siembra para cada una de las fincas, que para ambos casos es de 0.64Ha.

Para Cebolla:

$$\frac{400 \text{ bultos}}{0.64Ha} \rightarrow \frac{x}{1Ha}$$

$$x = \mathbf{625bultos/Ha}$$

Para Papa:

$$\frac{440 \text{ bultos}}{0.64Ha} \rightarrow \frac{x}{1Ha}$$

$$x = \mathbf{688bultos/Ha}$$

Ahora se calculan la cantidad de Kilogramos producidos por Hectárea, teniendo como referencia que un bulto pesa 50Kg.

Para Cebolla

$$625 * 50Kg = \mathbf{31.250Kg/Ha}$$

Para Papa

$$688 * 50Kg = \mathbf{34.400Kg/Ha}$$

Calculada la cantidad de Kg/Ha podemos saber la cantidad en Ton/Ha y Ton/m², valores que son necesarios para el cálculo de la huella hídrica.

Para Cebolla:

$$31.250 \frac{Kg}{Ha} * \frac{1Ton}{1000Kg} = \mathbf{31.25 \frac{Ton}{Ha}}$$

$$31.25 \frac{Ton}{Ha} * \frac{1Ha}{10.000m^2} = 31,25 \times 10^{-4} \frac{Ton}{m^2}$$

Para Papa:

$$34.400 \frac{Kg}{Ha} * \frac{1Ton}{1000Kg} = 34,4 \frac{Ton}{Ha}$$

$$34.4 \frac{Ton}{Ha} * \frac{1Ha}{10.000m^2} = 34,4 \times 10^{-4} \frac{Ton}{m^2}$$

- **Información del suelo**

Esta información nos permite identificar las características específicas del suelo en estudio, permitiéndonos determinar la disponibilidad de agua para el desarrollo de los cultivos de cebolla y papa, además de otros factores relacionados con el suelo que pueda afectar la producción del mismo.

- **Humedad del suelo disponible total**

El valor utilizado fue 60 mm/m ya que este corresponde a las proporciones óptimas para un suelo de tipo Franco Arcilloso (FAO, 2012), los valores a aplicar para ambos cultivos serán los mismos ya que según la prueba de identificación de textura en campo realizada en las fincas El Tuno y Hacienda el Jardín mediante la metodología propuesta por el Centro Internacional de Agricultura Tropical se obtuvo la misma característica (**Ver anexo 1**).

- **Tasa máxima de infiltración de precipitación**

Es la cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones; el valor utilizado fue de 40mm/día ya que corresponde al de un suelo Franco Arcilloso y está en función de la humedad del suelo y el material que lo conforma. (FAO, 2012)

- **Profundidad radicular máxima**

Según (FAO, 2010), se define este parámetro como la profundidad máxima de las raíces que determina la capacidad de los cultivos para aprovechar las reservas de agua presentes en el suelo. Esta profundidad depende de las características genéticas de cada planta.

Según la información suministrada por los propietarios de las fincas, la profundidad máxima alcanzada para cada cultivo y variedad es de 60cm.

- **Agotamiento inicial de la humedad del suelo**

Si el suelo se encuentra a capacidad de campo, el agotamiento es de 0 %; si el suelo está seco el agotamiento es de 100%. (Moreno, Cesan Lasso, & Valbuena Benavides, 2014) para nuestro caso se dejó un valor de 0% ya que los cultivos siempre se mantuvieron a capacidad de campo.

- **Humedad de suelo inicialmente disponible**

Volumen de agua inicialmente disponible en el suelo antes de realizarse el riego. Este valor fue calculado automáticamente por el programa Cropwat 8.0 obteniendo un valor de 60mm/metro.

4 RESULTADOS

4.1 CUANTIFICACIÓN HUELLA HÍDRICA AZUL

La huella hídrica azul ($HH_{Proc, azul}$ [m^3/ton]), Ecuación 3, corresponde al cociente entre el agua aprovechada por el cultivo proveniente de riego (CW_{Uriego}), y, Y el rendimiento del cultivo (Ton/m). (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011)

La cantidad de agua que aprovecha el cultivo proveniente del riego, corresponde a la diferencia entre los requerimientos hídricos y la precipitación efectiva. Siendo el valor de requerimiento de riego del cultivo el que se divide por el rendimiento del mismo, entendiéndose este último como la cantidad de producto final cosechado, dividido por el área en que fue producido. (Barros, 2012).

A continuación, se expresa la ecuación y las variables que se tuvieron en cuenta para su cálculo:

$$HH_{proc, azul} = \frac{CW_{Uriego}}{Y}$$

Ecuación 3: Calculo Huella Azul

Dónde:

$HH_{proc, azul}$ = Huella Hídrica Azul (m^3/Ton)

CW_{Uriego} = Requerimientos de riego de los cultivos (m)

Y = Rendimiento del cultivo (Ton/m^2).

Para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos, se utilizó el programa CROPWAT 8.0 en el cual a través de la estimación de la evapotranspiración potencial ligado a las características de los cultivos y del suelo, se obtuvieron los requerimientos de riego del cultivo. (Ver ilustración 5 y 6)

Ilustración 5: Requerimientos Hídricos Cultivo de Cebolla

| Requerimiento de Agua del Cultivo | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|------|------|------------------|--------|------------|-----------|
| Estación ETo | | | | Cultivo | | | |
| Surbata Bonza | | | | Cebolla | | | |
| Est. de lluvia | | | | Fecha de siembra | | | |
| Surbata Bonza | | | | 29/05 | | | |
| Mes | Decada | Etap | Kc | ETc | ETc | Prec. efec | Req.Riego |
| | | | coef | mm/día | mm/dec | mm/dec | mm/dec |
| May | 3 | Inic | 1.00 | 3.80 | 11.4 | 3.9 | 11.4 |
| Jun | 1 | Inic | 1.00 | 3.78 | 37.8 | 1.3 | 36.5 |
| Jun | 2 | Des | 1.00 | 3.76 | 37.6 | 0.0 | 37.6 |
| Jun | 3 | Des | 1.00 | 3.86 | 38.6 | 0.2 | 38.4 |
| Jul | 1 | Des | 1.00 | 3.96 | 39.6 | 1.9 | 37.7 |
| Jul | 2 | Des | 1.00 | 4.06 | 40.6 | 2.6 | 38.0 |
| Jul | 3 | Des | 1.00 | 4.03 | 44.4 | 4.0 | 40.4 |
| Ago | 1 | Med | 1.00 | 4.01 | 40.1 | 5.5 | 34.6 |
| Ago | 2 | Med | 1.00 | 3.99 | 39.9 | 6.9 | 33.0 |
| Ago | 3 | Fin | 0.77 | 3.12 | 34.3 | 8.3 | 26.0 |
| Sep | 1 | Fin | 0.39 | 1.63 | 8.2 | 5.0 | 3.1 |
| | | | | | 372.4 | 39.7 | 336.6 |

Fuente: Autores

Ilustración 6 Requerimientos Hídricos Cultivo de Papa

| Requerimiento de Agua del Cultivo | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|------|------|------------------|--------|------------|-----------|
| Estación ETo | | | | Cultivo | | | |
| Teatinos | | | | Papa | | | |
| Est. de lluvia | | | | Fecha de siembra | | | |
| Teatinos | | | | 12/05 | | | |
| Mes | Decada | Etap | Kc | ETc | ETc | Prec. efec | Req.Riego |
| | | | coef | mm/día | mm/dec | mm/dec | mm/dec |
| May | 2 | Inic | 0.50 | 1.61 | 14.5 | 25.3 | 0.0 |
| May | 3 | Inic | 0.50 | 1.55 | 17.0 | 33.1 | 0.0 |
| Jun | 1 | Des | 0.53 | 1.58 | 15.8 | 42.3 | 0.0 |
| Jun | 2 | Des | 0.72 | 2.05 | 20.5 | 48.5 | 0.0 |
| Jun | 3 | Des | 0.94 | 2.73 | 27.3 | 38.3 | 0.0 |
| Jul | 1 | Med | 1.12 | 3.35 | 33.5 | 24.2 | 9.4 |
| Jul | 2 | Med | 1.14 | 3.51 | 35.1 | 14.7 | 20.4 |
| Jul | 3 | Med | 1.14 | 3.59 | 39.5 | 15.4 | 24.0 |
| Ago | 1 | Med | 1.14 | 3.67 | 36.7 | 17.5 | 19.2 |
| Ago | 2 | Fin | 1.14 | 3.74 | 37.4 | 17.2 | 20.2 |
| Ago | 3 | Fin | 1.05 | 3.48 | 38.2 | 15.9 | 22.3 |
| Sep | 1 | Fin | 0.91 | 3.04 | 30.4 | 11.2 | 19.2 |
| Sep | 2 | Fin | 0.79 | 2.67 | 21.3 | 6.7 | 12.9 |
| | | | | | 367.4 | 310.4 | 147.7 |

Fuente: Autores

$$HH_{\text{azul}}(\text{cebolla}) = \frac{CW_{\text{Urie}}}{Y}$$

$$HH_{\text{azul}}(\text{cebolla}) = \frac{0.3366 \text{ m}}{31.25 \times 10^{-4} \text{ Ton/m}^2}$$

$$HH_{\text{azul}}(\text{cebolla}) = 107 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{azul}}(\text{papa}) = \frac{CW_{\text{Urie}}}{Y}$$

$$HH_{\text{azul}}(\text{papa}) = \frac{0.1477 \text{ m}}{34.4 \times 10^{-4} \text{ Ton/m}^2}$$

$$HH_{\text{azul}}(\text{papa}) = 43 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

4.2 CUANTIFICACIÓN HUELLA HÍDRICA VERDE

Esta huella corresponde al cociente entre el agua utilizada por el cultivo proveniente de precipitación y el rendimiento del cultivo (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011) La cantidad de agua que es aprovechada por el cultivo proveniente de precipitación es equivalente a la precipitación efectiva, por lo cual la huella hídrica verde puede entenderse como la razón entre la precipitación efectiva del lugar donde se ubica el cultivo con el rendimiento del mismo. (Barros, 2012)

$$HH_{\text{proc, verde}} = \frac{P_{\text{ef}}}{Y}$$

Ecuación 4: Calculo Huella verde

Dónde:

HHproc,verde = Huella Hídrica Verde (m^3/Ton)

Pef = Precipitación efectiva en metros (m)

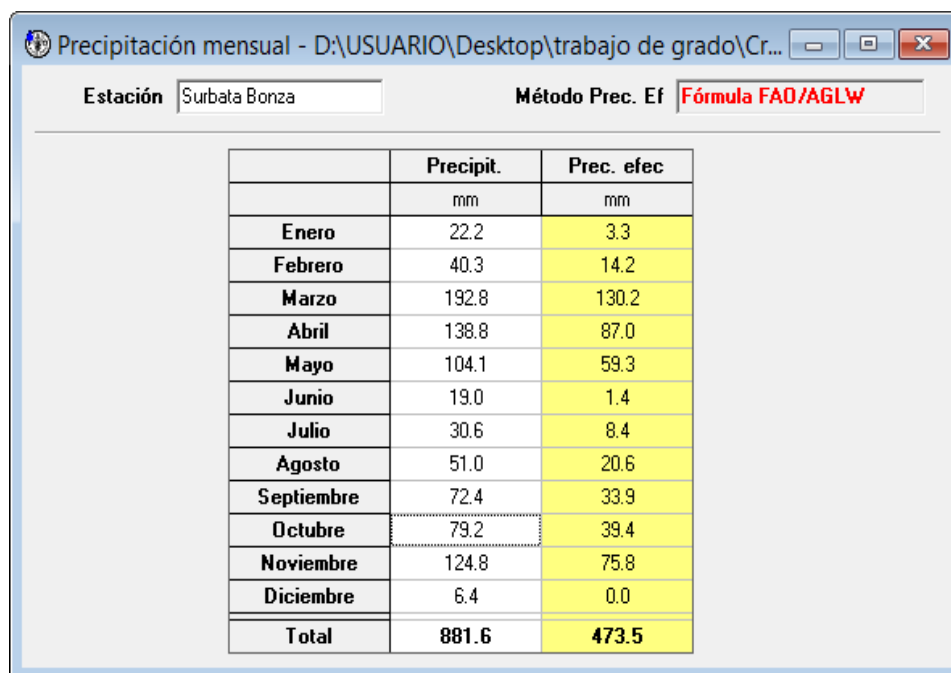
Y = Rendimiento del cultivo (Ton/m^2).

Precipitación Efectiva

Para el cálculo de este parámetro se configuró el programa CROPWAT 8.0 para que este utilizara la fórmula del AGLW (Servicio de Recursos, Fomento y aprovechamiento de Aguas de la FAO) la cual fue elaborada por un grupo de expertos del Servicio de Aguas de la FAO para climas semiáridos y subhúmedos en la cual se considera la estimación de la precipitación efectiva como un efecto combinado de la precipitación confiable (80% probabilidad de excedencia) con las pérdidas por escorrentía superficial y percolación profunda. (FAO, 2010)

Los valores de precipitación efectiva fueron determinados por el programa de modelación Cropwat 8.0 (Ver ilustración 7 y 8)

Ilustración 7: Valores de Precipitación efectiva para cultivo de Cebolla



| Estación | Surbata Bonza | Método Prec. Ef | Fórmula FAO/AGLW |
|------------|---------------|-----------------|------------------|
| | Precipit. | Prec. efec | |
| | mm | mm | |
| Enero | 22.2 | 3.3 | |
| Febrero | 40.3 | 14.2 | |
| Marzo | 192.8 | 130.2 | |
| Abril | 138.8 | 87.0 | |
| Mayo | 104.1 | 59.3 | |
| Junio | 19.0 | 1.4 | |
| Julio | 30.6 | 8.4 | |
| Agosto | 51.0 | 20.6 | |
| Septiembre | 72.4 | 33.9 | |
| Octubre | 79.2 | 39.4 | |
| Noviembre | 124.8 | 75.8 | |
| Diciembre | 6.4 | 0.0 | |
| Total | 881.6 | 473.5 | |

Fuente: Autores

Ilustración 8: Valores de Precipitación efectiva para cultivo de Cebolla

Precipitación mensual - D:\USUARIO\Desktop\trabajo de grado\Cr...

Estación: Teatinos Método Prec. Ef: Fórmula FAO/AGLW

| | Precipit. | Prec. efec |
|------------|-----------|------------|
| | mm | mm |
| Enero | 20.4 | 2.2 |
| Febrero | 8.6 | 0.0 |
| Marzo | 85.0 | 44.0 |
| Abril | 146.5 | 93.2 |
| Mayo | 142.7 | 90.2 |
| Junio | 191.5 | 129.2 |
| Julio | 97.8 | 54.2 |
| Agosto | 93.3 | 50.6 |
| Septiembre | 80.0 | 40.0 |
| Octubre | 196.8 | 133.4 |
| Noviembre | 96.1 | 52.9 |
| Diciembre | 16.0 | 0.0 |
| Total | 1174.7 | 690.0 |

Fuente: Autores

$$HHverde(cebolla) = \frac{Pef}{Y}$$

$$HHverde(cebolla) = \frac{0.4735 \text{ m}}{31.25 \times 10^{-4} \text{ Ton/m}^2}$$

$$HHverde(cebolla) = 151 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HHverde(papa) = \frac{Pef}{Y}$$

$$HHverde(papa) = \frac{0.69 \text{ m}}{34.4 \times 10^{-4} \text{ Ton/m}^2}$$

$$HHverde(papa) = 200 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

4.3 CUANTIFICACIÓN HUELLA HÍDRICA GRIS

La estimación del componente gris de la huella hídrica depende de la tasa de aplicación de productos químicos por hectárea, la fracción de lixiviación, el rendimiento del cultivo, concentración máxima permisible y concentración natural de los contaminantes en el cuerpo de agua receptor. En este orden de ideas, la huella hídrica gris se calcula a partir de la multiplicación de la tasa de aplicación de los productos químicos por la fracción de lixiviación, dividido entre la diferencia de concentraciones, es decir, concentración máxima menos la concentración natural de la fuente receptora, todo lo anterior dividido entre el rendimiento del cultivo según se expresa en la Ecuación 5.

$$HH_{proc,gris} = \frac{(\alpha * AR)/(C_{max} - C_{nat})}{Y}$$

Ecuación 5: Calculo Huella Gris

Dónde:

HH_{proc,gris}: Huella Hídrica Gris (m³/Ton)

α: Fracción de Lixiviación del agua de riego aplicada (%)

AR: Cantidad de fertilizante aplicada al cultivo (Kg/Ha)

C_{max}: Concentración Máxima permisible de contaminante en la fuente receptora (Kg/m³)

C_{nat}: Concentración Natural del contaminante en la fuente receptora (Kg/m³)

Y: Rendimiento del cultivo (Ton/Ha)

Se asumió un 10% para la fracción de lixiviación según lo plantea (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011), debido a que no se tenían datos específicos del porcentaje de lixiviación en los cultivos.

Por otro lado, el cálculo de la tasa de aplicación de productos químicos se realizó por cada uno de los nutrientes principales que en su composición contienen los fertilizantes compuestos aplicados a los cultivos, para el caso del cultivo de cebolla se hizo aplicación del fertilizante Triple 18 y para el cultivo de papa se hizo aplicación del fertilizante 13-26-6, es decir nitrógeno, fósforo y potasio.

No se tuvo en cuenta otro tipo de productos químicos como insecticidas, fungicidas y herbicidas, debido a que las concentraciones máximas se expresan por medio de dosis letales de un organismo, es decir, la resistencia de un organismo a cierta cantidad de producto, para ello, fungicidas se tendría que realizar un estudio que certifique la resistencia del organismo a la tasa de aplicación del producto.

Los resultados de la tasa de aplicación de los nutrientes se sintetizan en la **Tabla 11** y las cantidades de Elemento aplicados se definirán a continuación.

Tabla 11: Cantidades de fertilizante aplicados en Cultivos

| Cultivo | Fertilizante | Cantidad de Fertilizante (bultos) | cantidad (kg/Ha) |
|---------|--------------|-----------------------------------|------------------|
| Cebolla | 18-18-18 | 30 | 2344 |
| Papa | 13-26-6 | 25 | 1950 |

Fuente: Autores

Tabla 12 Composición química fertilizante 18-18-18

| Composicion del fertilizante 18-18-18 aplicado en cultivo de Cebolla | |
|--|-----|
| Nitrogeno | 18% |
| Fosforo | 18% |
| Potasio | 18% |

Fuente: Autores

$$Tn = Cn * Cf$$

Ecuación 6: Tasa de aplicación de nitrógeno

Dónde:

Tn: Tasa de aplicación de Nitrógeno (Kg/Ha)

Cn: Concentración de Nitrógeno en fertilizante (%)

Cf: Cantidad de fertilizante aplicado (Kg/Ha)

$$Tn = 0.18 * 2344 \text{ Kg/Ha}$$

$$Tn = 421,9 \frac{\text{Kg}}{\text{ha}} \text{ N, P, K}$$

Las tasas de aplicación de Fósforo y Potasio van a ser de la misma cantidad, ya que poseen la misma concentración del elemento.

Tabla 13: Composición química fertilizante 13-26-6

| Composicion del ferrtilizante 13-26-6 aplicado en cultivo de Papa | |
|--|-----|
| Nitrogeno | 13% |
| Fosforo | 26% |
| Potasio | 6% |

Tasa de aplicación de Nitrógeno (Tn):

$$Tn = Cn * Cf$$

$$Tn = 0.13 * 1950 \text{ Kg/Ha}$$

$$Tn = 253,5 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}} \text{ N}$$

Tasa de aplicación de Fósforo (Tp):

$$Tp = Cp * Cf$$

$$Tp = 0.26 * 1950 \frac{Kg}{Ha}$$

$$Tp = 507 \frac{Kg}{Ha} P$$

Tasa de aplicación de Potasio (Tk):

$$Tk = Ck * Cf$$

$$Tk = 0.06 * 1950 \frac{Kg}{Ha}$$

$$Tk = 117 \frac{Kg}{Ha} K$$

En cuanto a las concentraciones máximas permisibles no se encontró valor de referencia para el Fósforo ni el Potasio, Por lo tanto, solo se continuó desarrollando los cálculos con el nitrógeno. Tomando el valor de referencia para este elemento la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el cual expresa la concentración en mg/l de NO₃. Para efectos de cálculos se realizó la conversión de los mg/l de NO₃ a mg/lN de la siguiente forma.

| | Kgmol NO3 | Kgmol N | Kgmol O3 |
|----------------------|-----------|---------|----------|
| Masamolecular | 62 | 14 | 48 |
| % Composicion | 100 | 22.58 | 77.42 |

Concentración máxima permisible para fertilizante 18-18-18

$$Concentracion\ de\ N = \frac{18mg}{l} * 0,2258$$

$$Concentracion\ de\ N = 4,06 \frac{mg}{l} N$$

$$\text{Concentracion de N} = \frac{4,06 \times 10^{-3} \text{Kg}}{\text{m}^3} \text{N}$$

Concentración máxima permisible para fertilizante 13-26-6

$$\text{Concen} \quad \text{racion de N} = \frac{13 \text{mg}}{\text{l}} * 0,2258$$

$$\text{Concentracion de N} = 2,93 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{N}$$

$$\text{Concentracion de N} = \frac{2,93 \times 10^{-3} \text{Kg}}{\text{m}^3} \text{N}$$

Por otro lado, al no tener información sobre los valores de concentración de Nitrógeno de las fuentes receptoras que son la Quebrada Juncal en el municipio de Duitama y Quebrada La Chorrera del municipio de Samacá, se optó por asumir el valor de 0. Suponiendo que las concentraciones en el cuerpo hídrico natural son bajas, a partir de lo expresado por (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011)

Realizado el análisis ya se puede cuantificar la huella hídrica gris, de la siguiente forma:

$$HH_{gris}(cebolla) = \frac{(\alpha * AR)/(C_{max} - C_{nat})}{Y}$$

$$HH_{gris}(cebolla) = \frac{(0,1 * 421,9 \frac{\text{Kg}}{\text{Ha}}) / (4,06 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} - 0)}{31,25 \frac{\text{Ton}}{\text{Ha}}}$$

$$HH_{gris}(cebolla) = 332 \text{m}^3 / \text{Ton}$$

$$HH_{gris}(papa) = \frac{(\alpha * AR)/(C_{max} - C_{nat})}{Y}$$

$$HH_{gris}(papa) = \frac{(0,1 * 253,5 \frac{Kg}{Ha}) / (2,93 * 10^{-3} \frac{Kg}{m^3} - 0)}{34,4 \frac{Ton}{Ha}}$$

$$HH_{gris}(cebolla) = 251 m^3 / Ton$$

3.5.4. Huella hídrica total

Con los valores de los componentes de la huella hídrica (azul, verde, gris) calculados anteriormente para cada uno de los cultivos, se determina la huella hídrica total de la siguiente forma:

$$HH_{total}(cebolla) = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris} [m^3/Ton]$$

$$HH_{total}(cebolla) = 107 + 151 + 332 [m^3/Ton]$$

$$HH_{total}(cebolla) = 590 [m^3/Ton]$$

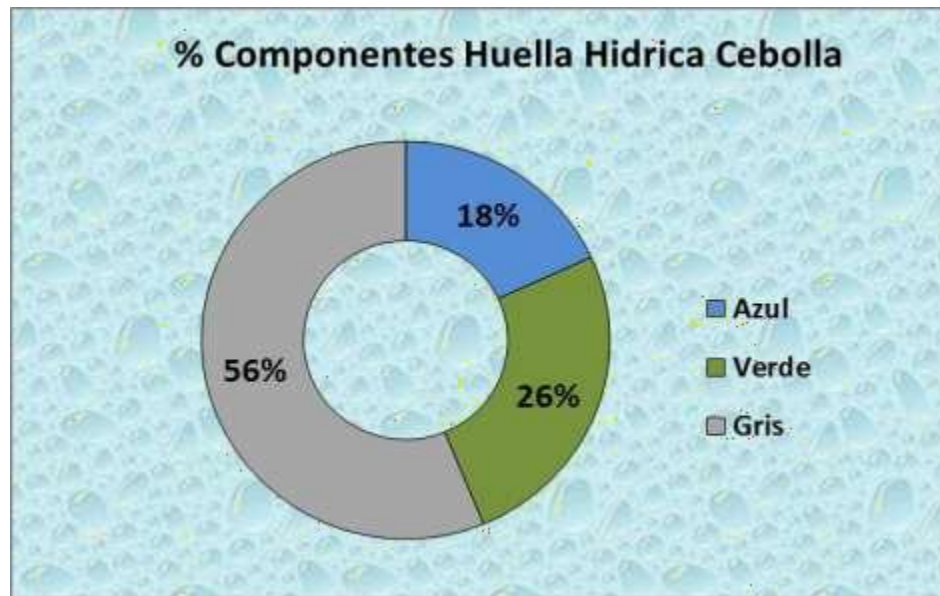
$$HH_{total}(papa) = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris} [m^3/Ton]$$

$$HH_{total}(papa) = 43 + 200 + 251 [m^3/Ton]$$

$$HH_{total}(papa) = 494 [m^3/Ton]$$

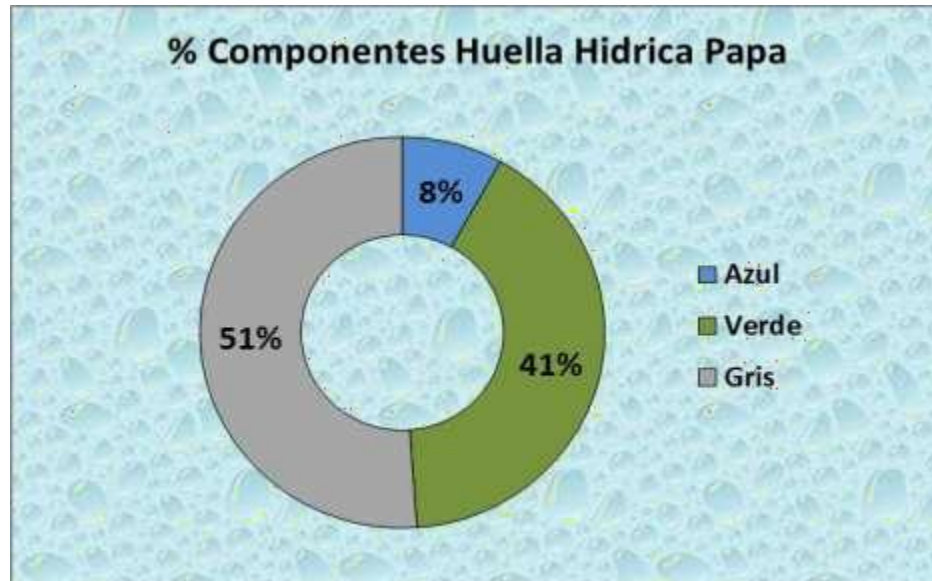
En síntesis, los resultados obtenidos de la huella hídrica total para la producción de Cebolla de Bulbo y Papa se presentan en las ilustraciones 9 y 10, expresado en valores de porcentaje.

Ilustración 9: Porcentaje de huella hídrica total cebolla



Fuente: Autores

Ilustración 10: Porcentaje de huella hídrica total papa



Fuente: Autores

5 ANALISIS DE RESULTADOS

Dentro del análisis de resultados es muy importante aclarar que al momento de realizar la cuantificación de la huella hídrica no se tuvo en cuenta el volumen de agua aplicado mediante aspersión en las fincas, esto debido a que no se contaban con datos precisos para poder cuantificar dichos volúmenes, la información que fue solicitada y entregada por parte del propietario, no daba cuenta de los tiempos exactos de riego, la fracción de área que fue regada y las especificaciones técnicas de las bombas, lo cual nos impedía realizar el cálculo y entregar unos resultados fiables.

Aclarado esto, podemos observar dentro de los resultados presentados que la huella hídrica total para el cultivo de cebolla ($590 \text{ m}^3/\text{ton}$) es mucho mayor en relación al de papa ($494 \text{ m}^3/\text{Ton}$), dando como resultado una diferencia de 96 metros cúbicos de agua por tonelada producida.

Para ambos casos el mayor volumen de agua registrado está en el componente gris, representando en el cultivo de papa el 51% del total reportado, y para el cultivo de cebolla el 56%, situación que hace pensar que la agricultura no solo es el sector que mayor agua demanda en el país, si no que a su vez se constituye como uno de los grandes contaminantes de cuerpos de agua, debido a la utilización de fertilizantes y plaguicidas sin ningún tipo de control ni regulación. Esta situación es típica, debido a que, en muchos casos, los pequeños y grandes cultivadores, prefieren pecar por exceso y no por defecto, ya que una mala siembra, o una cosecha que presente problemas de enfermedades y plagas, repercute en grandes pérdidas económicas, por consiguiente, se suele aplicar más de lo necesario.

En el caso de la huella hídrica azul se tiene que para cebolla el resultado es de $107 \text{ m}^3/\text{ton}$ y para papa está sobre $43 \text{ m}^3/\text{ton}$, resultado que va de la mano con las características propias del cultivo ya que el requerimiento hídrico de la cebolla es mucho mayor al de la papa teniendo un K_c y un K_y mayor

De igual forma, los resultados de huella hídrica verde responden a las características de ambos cultivos, para papa el resultado fue de 200 y para la cebolla de $151 \text{ m}^3/\text{ton}$, esto justificado

En las características de la papa el cual es un cultivo con unas raíces mucho más largas en relación a la cebolla, dando como resultado, que esa fracción de lluvia que no se pierde por infiltración profunda o escorrentía (precipitación efectiva) y se encuentra disponible en el suelo, sea en mayor media absorbida por sus profundas raíces.

Para poder hacer un análisis de resultados más amplio, se comparó los resultados obtenidos con la información presenta en el Estudio nacional de agua 2014 –ENA- desarrollado por el IDEAM.

Es importante aclarar la metodología que fue empleada para la obtención de los cálculos por parte del ENA, ya que esto influye en las diferencias de los resultados obtenidos.

En el estudio nacional de agua 2014 se cuantifico La demanda hídrica del sector agrícola a través de la cuantificación de los requerimientos hídricos en los cultivos, para ello analizaron la interrelación con las variables climáticas y de suelos para toda Colombia.

El requerimiento hídrico del cultivo lo determinaron a partir del cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y del balance de agua en el suelo, definiendo mes a mes, el agua que el suelo retiene proveniente de la lluvia o del riego y que el cultivo puede extraer en su zona radicular.

Para el balance de agua en el suelo definieron que La evapotranspiración de los cultivos ET_a es proporcional a la evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o (FAO, 2006), así, se ajustó la variable con un factor de cultivo k_c (adimensional) que representa la variación de la evapotranspiración de cada cultivo con respecto al cultivo de referencia.

Adicionalmente se ajusta la evapotranspiración de los cultivos con un factor de estrés hídrico K_s según la siguiente ecuación:

$$ET_a = K_s * k_c * ET_o$$

Teniendo en cuenta que la necesidad de riego se genera en condiciones de agotamiento, utilizaron la variable K_s en el balance para determinar en qué momento y en qué cantidad se requiere. Este se calcula a partir del balance (Figura 4.7) y mide la disminución del agua previamente disponible en la zona radicular del suelo, bajo condiciones de humedad del suelo, precipitación y riego efectivo.

Finalmente, se discrimina la evapotranspiración que se suple con el riego, relacionada directamente con el Agua Azul y definida como la *ETaazul* y la parte que se suple con agua de lluvia relacionada directamente con el Agua Verde *ETaverde*

Una vez aclarada la metodología, se presenta los resultados de nuestro estudio y los del Estudio nacional de agua, estos últimos, fue necesario realizar unos cálculos para poder obtener resultados en las mismas unidades, con el fin de poder realizar un análisis.

Una vez dicho esto, a continuación, se presenta la tabla 14 y 15, con los resultados de los dos estudios.

Tabla 14: Comparación resultados huella hídrica para cultivo de papa

| Huella Hídrica Papa HH(m ³ /Ton) | | ENA 2014 HH(m ³) | Área cultivada ENA (ha) | Rendimiento (Ton/Ha) | Toneladas cultivadas | ENA 2014 HH(m ³ /ton) |
|--|-----|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Azul | 43 | 11.1700.000 | 147795,81 | 17,3 | 2.556.867,513 | 43,68 |
| Verde | 200 | 515.300.000 | | | | 201,53 |
| Gris | 251 | N.A | | | | N.A |
| Total | 494 | N.A | | | | N.A |

Fuente: Autores

Tabla 15: Comparación resultados huella hídrica para cultivo de cebolla

| Huella Hídrica Cebolla (m ³ /Ton) | | ENA 2014 HH(m ³) | Área cultivada ENA(ha) | Rendimiento (Ton/Ha) | Toneladas cultivadas | ENA 2014 HH(m ³ /ton) |
|--|-----|------------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|
| Azul | 107 | 6.280.000 | 13934,22 | 20,06 | 196.920 | 31,89 |
| Verde | 151 | 31.050.000 | | | | 157,67 |
| Gris | 332 | N.A | | | | N.A |
| Total | 590 | N.A | | | | N.A |

Fuente: Autores

En las tablas 14 y 15 se muestra la cuantificación de la huella hídrica para papa y cebolla respectivamente, en las tablas se observan valores de área cultivada, rendimiento y toneladas, estos datos fueron necesarios incluirlos para realizar la conversión de millones de m³ de agua, que es como lo reportan en el ENA, a unidades de m³/ton.

Para la variable área cultivada, se obtuvo la información del ENA, estos datos corresponden a la información concertados entre el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y el DANE para el año 2013, año que está incluido dentro del periodo de estudio y elaboración de dicho informe. Los datos de rendimientos fueron obtenidos de información del Dane y el Ministerio de Agricultura y desarrollo rural para el caso de la cebolla; para papa se tuvo en cuenta un informe elaborado por la FAO.

Finalmente, el dato de toneladas cultivadas es la multiplicación entre el área y el rendimiento del cultivo, Información necesaria para dividir sobre el reporte de millones de metros cúbicos de agua que presenta el ENA, para que, de esta manera, las variables puedan ser analizadas de manera más precisa.

Es importante resaltar que, para el caso de cebolla al hacer la multiplicación, las toneladas cultivadas era un dato mucho mayor a la información proporcionada por el DANE, en el boletín mensual número 49 que menciona los insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. (DANE,

2016), por consiguiente, el dato que se muestra en la tabla, corresponde a la información asociada en dicho documento.

Dicho esto, podemos ver que para el caso de papa, el presente estudio dio como resultado una huella hídrica azul de 43 m³/ton y huella hídrica verde de 200 m³/ton, en el ENA el resultado fue de 43,68 y 201,53 m³/ton para el componente azul y verde respectivamente, en cuanto a la huella hídrica gris, no se tiene una cuantificación en el ENA debido a que no se cuenta en el país con información suficiente de aplicación de fertilizantes en cultivos agrícolas y caracterización físico química de todos los cuerpos de agua.

Para el caso de la cebolla de bulbo los resultados de la cuantificación del presente estudio fueron de 107 m³/ton en el componente azul y 151 m³/ton en el componente verde, en el ENA se reportaron valores de 21,89 y 157,67 m³/ton para la huella azul y verde respectivamente.

Dentro del análisis de datos que se puede generar, podemos apreciar que para el caso de la papa los valores tanto de huella hídrica azul como verde son muy similares, la diferencia está en un rango menor al metro cubico por tonelada, lo cual responde a que estadísticamente el departamento de Boyacá es el segundo productor a nivel nacional de papa, al realizar una comparación departamental, como lo fue el caso del presente estudio, con información de todo el país, se puede establecer que los resultados obtenidos son muy representativos ya que equivalen al 27% de la muestra comparada (el 90% de la producción nacional se concentra en cuatro departamentos: Cundinamarca (37%), Boyacá (27%), Nariño (20%) y Antioquia (6%)). (Fondo Nacional De Fomento De La Papa, 2016)

Caso contrario sucede con la producción de cebolla, donde a pesar de ser el principal departamento productor del país, la diferencia en cuanto a la cuantificación de la huella hídrica azul es del orden de 85,14 metros cúbicos por tonelada producida, lo cual se puede llegar a justificar debido a que en Colombia la producción de cebolla está distribuida en muchos Departamentos (caso contrario de la papa que está concentrado en solo 4 departamentos), al intentar hacer una comparación del orden departamental con algo nacional, los resultados cambian sustancialmente debido a la

diferencia que hay en cuanto al tipo de suelo y las características propias de regímenes pluviométricos y climatológicos en los diferentes departamentos del país.

6 FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS

El consumo de agua empleada para riego en los cultivos de estudio se puede optimizar al implementar un calendario de riego, debido a que en este se planificaría el tiempo en el que se debe regar el cultivo. Para el desarrollo de esta alternativa se tendrían en cuenta los requerimientos hídricos que tienen las plantas de cebolla y papa a lo largo de su proceso productivo y los indicadores más convenientes para la programación del calendario, es decir indicadores directos o indirectos. Dentro de los directos se encuentran la humedad relativa, temperatura, humedad del suelo y apariencia de la hoja. Sin embargo, se requiere de estudios de las variables y actualización de la información para que el calendario satisfaga eficientemente los requerimientos hídricos del cultivo dependiendo de la interacción de otras variables como la evapotranspiración.

Otra estrategia, es realizar revisiones periódicas al sistema de riego, es decir tuberías, bomba, motor y empalmes. Esto se debe a que, si no se da un buen uso al sistema, se han presentado fugas de agua por el desgaste de los empaques que se utilizan para empalmar las tuberías, generando de esta forma pérdidas de agua. Junto a esta actividad, se propone implementar control de las presiones en la tubería, para ello es necesario incluir manómetros en ciertos puntos, con el fin de establecer que las presiones sean las adecuadas para que la presión del agua cuando llegue a los aspersores sea la apropiada, y así se aproveche al máximo el trabajo de succión de la bomba y el diámetro de alcance de distribución que tienen los aspersores.

Por último, se propone cambiar el sistema de riego por aspersión que actualmente se emplea en la Hacienda El Jardín y la finca El Tuno por un sistema de riego por goteo y que dentro de este sistema se realice la aplicación de la fertilización (Fertiriego), el cual, aunque no es tan utilizado en la producción de cebolla y papa, si se ha implementado en otros cultivos debido a la serie de ventajas que tiene su empleo; Una de ellas es que el agua llega directamente al sistema radicular de la planta, así como la nutrición de la misma, ayudando así al crecimiento adecuado y evitando el desperdicio de agua y fertilizante, reduciendo así los indicadores de Huella Verde y Huella Gris. Otra ventaja es que las mangueras están internamente recubiertas con materiales especiales que permiten que exista una distribución uniforme del agua, evitando de esta forma que los puntos de riego más lejanos a la bomba se conviertan en puntos críticos donde el agua no llega con el mismo impulso que aquellos que están más cercanos al sistema de bombeo.

7 CONCLUSIONES

Para los cultivos objeto de estudio, se calculó la huella hídrica por componente obteniendo valores para el cultivo de cebolla de $107 \text{ m}^3/\text{Ton}$ de huella azul, $151 \text{ m}^3/\text{Ton}$ de huella verde y $332 \text{ m}^3/\text{Ton}$ de huella gris, para un valor de huella hídrica total de $590 \text{ m}^3/\text{Ton}$.

Para el cultivo de papa se obtuvo valores de $43 \text{ m}^3/\text{Ton}$ de huella azul, $200 \text{ m}^3/\text{Ton}$ de huella verde y $251 \text{ m}^3/\text{Ton}$ de huella gris, para un valor de huella hídrica total de $494 \text{ m}^3/\text{Ton}$.

El cultivo agrícola que presenta la mayor demanda hídrica es la cebolla dando como resultado una diferencia de 96 metros cúbicos de agua por tonelada producida en relación a la papa, pero si se tiene en consideración los datos presentados en el estudio nacional de agua- 2014- la diferencia en producción es de aproximadamente 13 veces, siendo mucho más extensiva la papa con 2.556.867,513 toneladas producidas, contra 196.920 toneladas de cebolla , por ende, para el caso de Colombia es adecuado suponer que es mucho mayor la huella hídrica del cultivo de papa en relación a cebolla, debido a esas grandes diferencias en área y cantidad de producción.

El resultado de la huella hídrica gris para ambos cultivos, sería más real si se tomaran en cuenta todos los valores de la composición de los fertilizantes aplicados a los cultivos, sin embargo, uno de los limitantes que se encontraron, fue la falta de valores de referencia de concentración máxima en la normatividad colombiana, lo cual puede estar originando error en los resultados asumidos. Esto teniendo en cuenta que la cantidad de fosforo aplicada al cultivo de papa (26%), fue mayor a la aplicada de Nitrógeno (13%), y solo fue posible calcular la huella gris con este último elemento.

Las aplicaciones excesivas de productos químicos y fertilizantes por parte de los productores, generó un aumento significativo en el cálculo de la huella hídrica gris, por tal razón es necesario que el productor se conciente de hacer un análisis de suelo a sus predios con el fin de identificar las necesidades reales de NPK que requieren los cultivos objeto de estudio.

Los resultados presentados no incluyen en la cuantificación el volumen de agua aplicado mediante aspersión en las fincas, lo cual se constituye como un sesgo debido a que dentro del balance hídrico no se tuvo en consideración esta entrada, siendo muy probable que haya un aumento en los valores de huella hídrica total en ambos cultivos. Sin embargo, cabe resaltar que para el cultivo de papa el reporte hecho por el propietario fue únicamente de dos aplicaciones de riego en toda la etapa de producción, para el caso de la cebolla, si se registra una aplicación quincenal de agua mediante riego.

Es importante tener en cuenta que la etapa de crecimiento de los cultivos es donde se tiene la mayor demanda hídrica, por consiguiente, es necesario hacer hincapié con los agricultores en que se hagan las siembras en los meses donde la precipitación es mayor, para el caso propio de Duitama y Sanaca es el periodo comprendido entre marzo a mayo.

Finalmente se puede concluir que Cuantificar el consumo de agua y su composición (verde, azul y gris) permite determinar no solo el nivel de eficiencia en términos de disponibilidad y demanda, sino también el impacto que se genera al medio ambiente y, fundamental, la identificación y elaboración de planes y propuestas que mejoren las prácticas en el sector. Un buen conocimiento y una aplicación apropiada del concepto de la huella hídrica permiten mejorar la comprensión del impacto que la actividad agrícola sobre el recurso hídrico, ayudando a establecer las bases científicas para una mejor gobernanza del recurso y un mejor aprovechamiento del mismo.

8 RECOMENDACIONES

Estudios de análisis fisicoquímicos del suelo son importantes para establecer una dosis adecuada de fertilizante y de otros productos químicos empleados que garantizaran una óptima producción en los cultivos, con esto se puede mejorar los impactos ambientales que son generados por la gran cantidad de fertilizantes y pesticidas en los suelos

Se recomienda implementar el sistema de riego por goteo, debido a que es una buena alternativa para un mejor aprovechamiento del agua, debido a que disminuyen los problemas que tiene el sistema de riego por aspersión como lo son: encharcamientos, proliferación de enfermedades, pudriciones de fruto y excesos de aplicación de recurso hídrico.

Es importante contar con una buena recopilación de datos de campo en estos proyectos realizados en fincas pilotos, se hace necesario conocer a profundidad las características del suelo, las condiciones fisicoquímicas del cuerpo de agua más cercano, e información relevante relacionada con los sistemas de riego aplicados, con esto los resultados se pueden acercar mucho más a la realidad y la información obtenida se constituye como una herramienta de primera mano para la toma de decisiones.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Agropecuário, S. d. (2018). *Documento de Diagnostico Cadenas Productivas*. Tunja.
- Arevalo, D., Lozano, J., & Javier, S. (2011). *Estudio nacional de Huella Hídrica Colombia sector agrícola*. Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/11915/101-126%20Arevalo_Huella%20Hidrica.pdf
- Barros, M. J. (2012). *ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS CON POTENCIAL BIOENERGÉTICO EN LA PROVINCIA DE LIMARÍ, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE*. Chile: Universidad de Chile.
- Boyaca, G. d. (2018). *OTB ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEPARTAMENTAL DE BOYACA*. Tunja: Gobernacion de Boyaca.
- Cedula, E. D. (2013). *Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- CIAT. (2013). Rapid Soil and Terrain Assessment.
- Codazzi, I. G. (07 de junio de 2018). *todacolombia*. Obtenido de www.todacolombia.com
- Corpoica. (2016). *Guia para la implementacion de buenas practicas agricolas en cebolla de bulbo*. Bogotá: Corpoica.
- DANE. (2015). *Cuentas Trimestrales - Colombia Producto Interno Bruto (PIB)*. Bogotá.

DANE. (2016). *El cultivo de la cebolla cabezona (Allium cepa L.) frente a condiciones de alta humedad*. Bogotá.

FAO. (2002). *FAO.ORG*. Recuperado el 30 de Abril de 2019, de <http://www.fao.org/WorldFoodSummit/sideevents/papers/Y6899S.htm>

FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo "Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos"*. Roma: FAO.

FAO. (2010). Cropwat 8.0 Model, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia. Obtenido de www.fao.org

FAO. (12 de 12 de 2012). *www.fao.org*. Obtenido de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

Fondo Nacional De Fomento De La Papa. (2016). *Informe de Gestion*.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual*. Londres: Earthscan.

ICA. (26 de junio de 2016). *Manejo fitosanitario del cultivo de hortalizas*. Bogota: ICA.

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional de agua 2014*. Bogotá.

IDEAM. (2018). *ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA (ENA- 2018)*.

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2010). *Consultas regionales de la EAE para la alta montaña cundiboyacense y la altillanura* . Bogotá.

Moreno, J., Cesan Lasso, M., & Valbuena Benavides, R. (2014). *¿Que sabes del cultivo de papa?* Bogotá: ICA.

PRONATTA. (2002). *El cultivo de la cebolla cabezona blanca*. Bogotá.

PRONATTA. (2002). *El cultivo de la cebolla cabezona blanca*. Bogotá.

Rocha, A. (2016). *El agua virtual en el siglo XXI*. Lima.

S.E, S. L. (2014). *Cálculo y analisis de la huella hidrica de la provincia se San Luis*. Argentina: Estado de San Luis.

Santos Rojas, J., & Orena Alvarado, S. (2014). *Manual de produccion de papa para agricultura familiar*. Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones agropecuarias.

10 ANEXOS

Anexo 1: Registro Fotográfico (siembra – cosecha)












Cultivo de Cebolla



Cultivo de Papa

Anexo 2: Identificación de Clase Textural propuesto por CIAT

| | |
|---|--|
| <p>Textura</p> <p>En el suelo existen diversas partículas, entre las cuales las más importantes difieren por su tamaño y se clasifican como arcillas, limos y arenas. La textura es la proporción que hay de cada una de ellas en el suelo, y se expresa en porcentaje (%).</p> <p>Influye en procesos de retención y almacenamiento de agua y oxígeno, en la fertilidad, la porosidad y el drenaje, entre otros.</p> <p>Las manos humanas son sensibles a la diferencia de tamaños de las partículas de tierra, de manera que estamos en posibilidad de determinar la textura o sentir al tacto la consistencia de la tierra. Así, por ejemplo, sentimos la arena áspera, el limo suave o harinoso y la arcilla pegajosa y dura.</p> <p>Materiales: Agua, clave textural (adjunta) y suelo.</p> <p>Procedimiento: Para cada horizonte o capa identificada, siga los pasos que se indican a continuación, hasta llegar a la textura de su suelo. Anote en la Hoja de Respuestas No. 1, las texturas que están entre paréntesis. Ejemplo: FRANCO ARCILLOSO (FA)</p> <p>Preparación de la muestra</p> <p>Paso A</p>  <p>Ponga en la mano una cantidad de suelo que pueda manipular fácilmente.</p> <p>Paso B</p>  <p>Agregue un poco de agua, de tal forma que pueda amasar con facilidad. Esto que se forme un bolo difícil de manipular. Si se excedió en el agua, agregue un poco de suelo y continúe amasándolo.</p> | <p>Paso C</p>  <p>Amase bien el suelo hasta que quede una masa COMPLETAMENTE HOMOGÉNEA Y SIN GRUMOS.</p> <p>Tenga en cuenta que si el suelo tiene grumos no podrá formar rollos ni círculos.</p> <p>Clave textural</p> <p>Paso 1</p>  <p>Intente formar un rollo del grueso de un lápiz y trate de doblarlo para formar un círculo, sin que se rompa o se quiten. (El suelo debe tener muy buena humedad).</p>  <p>A. Si Muebles el rollo se rompe al doblarlo o simplemente no forma rollo. Vaya al Paso 2</p>  <p>B. Si Muebles el rollo no se rompe al doblarlo. Vaya al Paso 2</p> |
| <p>Paso 2</p> <p>Forma bolas poco consistentes y rollos que se agrietan o parten al ser doblados.</p> <p>Vaya al Paso 4 No forma bolas ni rollos. Vaya al Paso 5</p> <p>Paso 3</p> <p>Caja un peducho de suelo en la mano y agregar agua. Al tratarlo con el dedo índice en la palma de la mano, usted:</p> <p>Siente el suelo suave y pastoso, con algunos grumos de arena. Vaya al Paso 12</p> <p>Siente el suelo áspero y con muchos grumos de arena. Vaya al Paso 14</p> <p>Siente el suelo jabonoso y muy liso, sin grumos de arena visibles. Vaya al Paso 15</p> <p>Paso 4</p> <p>Caja un peducho de suelo en la mano y agregue agua. Al tratarlo con el dedo índice en la palma de la mano, usted:</p>  <p>Siente el suelo jabonoso y muy liso, sin grumos de arena. Vaya al Paso 6</p> <p>Siente el suelo suave y observa algunos grumos de arena. Vaya al Paso 7</p> <p>Siente el suelo áspero y observa muchos grumos de arena. Vaya al Paso 10</p> <p>Paso 5</p>  <p>Y además: Si una alfalfa, arja o paja se pueden hacer pirámides inestables, no es pegajoso, no mancha los dedos y se nota cada gramo de arena.</p> <p>AREOSO (A)</p> | <p>Paso 13</p>  <p>Y además: Al amasar se sienten algunos grumos, mancha mucho los manos, al raspar con la uña se forma una superficie rizada y cuando se seca deja una sensación talcosa.</p> <p>FRANCO-ARCILLOSO (FA)</p> <p>Si su suelo no coincide con esta descripción, entonces vuelva al Paso 3 e intente de nuevo.</p> |

Anexo 3: Memorias cálculo de Huella Hídrica para cultivo de cebolla

ETo Penman-Monteith Mensual - D:\USUARIO\Desktop\trabajo de grado\...

País: Colombia Estación: Subata Bonza

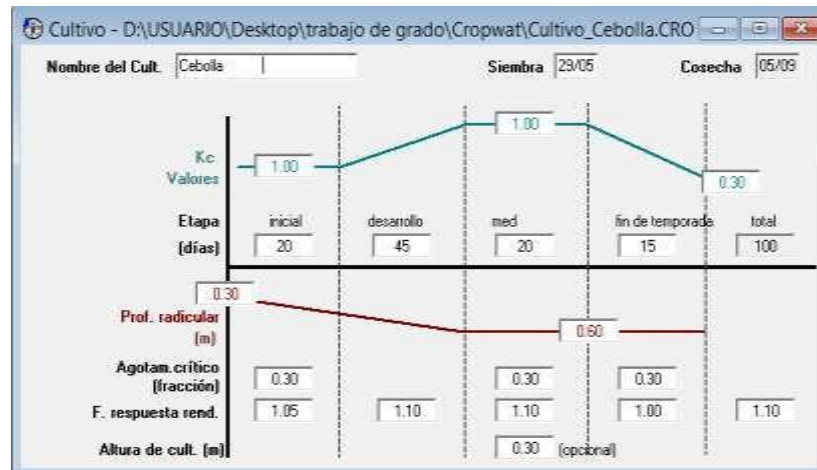
Altitud: 2485 m. Latitud: 5.80 °N Longitud: 73.07 °W

| Mes | Temp Min °C | Temp Max °C | Humedad % | Viento m/s | Insolación horas | Rad MJ/m²/día | ETo mm/día |
|------------|----------------|----------------|--------------|---------------|---------------------|------------------|---------------|
| Enero | 4.9 | 22.9 | 80 | 1.5 | 11.0 | 24.4 | 3.97 |
| Febrero | 8.2 | 24.3 | 67 | 1.5 | 10.2 | 24.4 | 4.42 |
| Marzo | 9.8 | 22.1 | 76 | 1.5 | 8.2 | 22.2 | 3.97 |
| Abril | 9.8 | 22.0 | 77 | 1.5 | 8.3 | 22.2 | 3.97 |
| Mayo | 8.9 | 21.5 | 78 | 1.5 | 8.6 | 21.9 | 3.83 |
| Junio | 8.0 | 21.0 | 75 | 1.5 | 8.9 | 21.8 | 3.76 |
| Julio | 6.4 | 21.4 | 71 | 1.5 | 10.1 | 23.7 | 4.05 |
| Agosto | 6.4 | 20.7 | 74 | 1.5 | 9.6 | 23.7 | 3.98 |
| Septiembre | 6.0 | 21.9 | 76 | 1.5 | 10.4 | 25.4 | 4.23 |
| Octubre | 9.2 | 21.6 | 77 | 1.5 | 8.3 | 21.6 | 3.74 |
| Noviembre | 9.8 | 22.4 | 76 | 1.5 | 8.3 | 20.6 | 3.69 |
| Diciembre | 5.2 | 22.3 | 89 | 1.5 | 10.6 | 23.3 | 3.72 |
| Promedio | 7.7 | 22.0 | 76 | 1.5 | 9.4 | 22.9 | 3.95 |

Precipitación mensual - D:\USUARIO\Desktop\trabajo de grado\Cr...

Estación: Subata Bonza Método Prec. Ef: Fórmula FAO/AGLW

| | Precipit. mm | Prec. efec mm |
|------------|-----------------|------------------|
| Enero | 22.2 | 3.3 |
| Febrero | 40.3 | 14.2 |
| Marzo | 192.8 | 130.2 |
| Abril | 138.8 | 87.0 |
| Mayo | 104.1 | 59.3 |
| Junio | 19.0 | 1.4 |
| Julio | 30.6 | 8.4 |
| Agosto | 51.0 | 20.6 |
| Septiembre | 72.4 | 33.9 |
| Octubre | 79.2 | 39.4 |
| Noviembre | 124.8 | 75.8 |
| Diciembre | 6.4 | 0.0 |
| Total | 881.6 | 473.5 |



Suelo - D:\USUARIO\Desktop\trabajo de grado\Cropwat\Suelo_ceboll...

Nombre del suelo Franco arcilloso

Datos generales de suelo

| | | |
|--|------|-------------|
| Humedad de suelo disponible total (CC-PMP) | 60.0 | mm/metro |
| Tasa maxima de infiltración de la precipitación | 40 | mm/día |
| Profundidad radicular máxima | 60 | centímetros |
| Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT) | 0 | % |
| Humedad de suelo inicialmente disponible | 60.0 | mm/metro |

Anexo 3: Memorias cálculo de Huella Hídrica para cultivo de papa

ETo Penman-Monteith Mensual - D:\USUARIO\Desktop\trabajo de grado\...

País Colombia Estación Tunalino

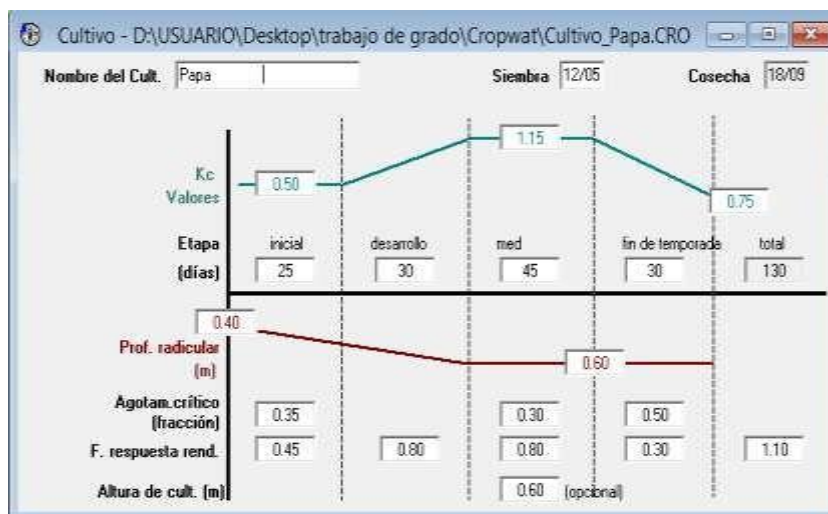
Altitud 3250 m. Latitud 5.42 °N Longitud 73.37 °W

| Mes | Temp Min °C | Temp Max °C | Humedad % | Viento m/s | Insolación horas | Rad MJ/m²/día | ETo mm/día |
|------------|-------------|-------------|-----------|------------|------------------|---------------|------------|
| Enero | 11.1 | 19.0 | 81 | 2.0 | 6.5 | 17.9 | 3.11 |
| Febrero | 9.6 | 20.9 | 79 | 2.0 | 7.6 | 20.5 | 3.67 |
| Marzo | 11.6 | 19.9 | 80 | 2.0 | 5.7 | 18.3 | 3.41 |
| Abril | 10.9 | 20.0 | 85 | 3.0 | 6.3 | 19.1 | 3.38 |
| Mayo | 10.9 | 19.6 | 85 | 2.0 | 6.1 | 18.1 | 3.23 |
| Junio | 11.5 | 18.5 | 88 | 2.0 | 4.9 | 15.9 | 2.83 |
| Julio | 8.7 | 18.0 | 86 | 3.0 | 6.6 | 18.6 | 3.07 |
| Agosto | 7.8 | 17.5 | 80 | 2.0 | 6.8 | 19.5 | 3.28 |
| Septiembre | 9.4 | 18.8 | 81 | 3.0 | 6.6 | 19.5 | 3.38 |
| Octubre | 10.2 | 19.7 | 81 | 2.0 | 6.9 | 18.9 | 3.37 |
| Noviembre | 10.5 | 19.9 | 81 | 3.0 | 6.4 | 17.9 | 3.27 |
| Diciembre | 7.9 | 19.7 | 76 | 2.0 | 7.8 | 19.4 | 3.42 |
| Promedio | 9.9 | 19.3 | 82 | 2.3 | 6.5 | 18.6 | 3.28 |

Precipitación mensual - D:\USUARIO\Desktop\trabajo de grado\Cr...

Estación: Teatinos Método Prec. Ef: Fórmula FAO/AGLW

| | Precipit. | Prec. efec |
|------------|-----------|------------|
| | mm | mm |
| Enero | 20.4 | 2.2 |
| Febrero | 8.6 | 0.0 |
| Marzo | 85.0 | 44.0 |
| Abril | 146.5 | 93.2 |
| Mayo | 142.7 | 90.2 |
| Junio | 191.5 | 129.2 |
| Julio | 97.8 | 54.2 |
| Agosto | 93.3 | 50.6 |
| Septiembre | 80.0 | 40.0 |
| Octubre | 196.8 | 133.4 |
| Noviembre | 96.1 | 52.9 |
| Diciembre | 16.0 | 0.0 |
| Total | 1174.7 | 690.0 |



Suelo - D:\USUARIO\Desktop\trabajo de grado\Cropwat\Suelo_papa.S...

Nombre del suelo: Franco Arcilloso

Datos generales de suelo:

| | | |
|--|------|-------------|
| Humedad de suelo disponible total (CC-PMP) | 60.0 | mm/metro |
| Tasa maxima de infiltración de la precipitación | 40 | mm/día |
| Profundidad radicular máxima | 60 | centímetros |
| Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT) | 0 | % |
| Humedad de suelo inicialmente disponible | 60.0 | mm/metro |